



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK SEIMBANG  
DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED GENERATION* (DG)  
UNTUK ANALISIS HUBUNG SINGKAT.**

Wiratama Tambunan  
NRP 07111440000177

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK SEIMBANG  
DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED GENERATION* (DG)  
UNTUK ANALISIS HUBUNG SINGKAT.**

Wiratama Tambunan  
NRP 07111440000177

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

***UNBALANCED DISTRIBUTION NETWORK  
DISTRIBUTION AND DISTRIBUTED GENERATION (DG)  
MODEL FOR SHORT CIRCUIT ANALYSIS.***

Wiratama Tambunan  
NRP 07111440000177

Supervisor  
Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK SEIMBANG DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) UNTUK ANALISIS HUBUNG SINGKAT**” adalah benar-benar hasil karya intelektual sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya orang lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Surabaya, 25 Mei 2018

Wiratama Tambunan  
NRP. 07111440000101

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....



**PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK  
SEIMBANG DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED*  
GENERATION (DG) UNTUK ANALISIS HUBUNG  
SINGKAT.**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing 1**

**Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.**  
**NIP : 194907151974121001**

**Dosen Pembimbing 2**

**Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.**  
**NIP : 195512071980031004**



.....*Halaman ini sengaja dikosongkan.*.....

# **PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK SEIMBANG DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) UNTUK ANALISIS HUBUNG SINGKAT.**

Nama : Wiratama Tambunan  
Pembimbing 1 : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

## **ABSTRAK**

Untuk memenuhi suplai daya listrik pada konsumen, maka dalam hal ini PLN harus meningkatkan operasinya. Pada suatu sistem kelistrikan yang mana beban semakin bertambah dari waktu ke waktu, dibutuhkan suatu sumber daya yang dapat mensuplai daya listrik disekitarnya dengan pemasangan *Distributed Generation* (DG). Dengan bertambahnya beban, dapat menyebabkan ketidakseimbangan antar fasa. Hal ini menjadi permasalahan umum yang sering terjadi, sehingga tegangan pada sistem menjadi tidak seimbang antar fasanya. Kondisi ini disebut *Voltage Unbalance*.

Didalam suatu sistem kelistrikan, keadaan abnormal pasti akan terjadi, salah satunya adanya gangguan. Gangguan yang umum terjadi adalah gangguan hubung singkat. Dalam studi ini akan disimulasikan hubung singkat pada sistem tidak seimbang. Dengan menggunakan *Single Line Diagram* jaringan distribusi Tegalsari, dapat mengetahui besar *Voltage Unbalance* saat kondisi *steady state* dan mengetahui besar hubung singkat pada jaringan distribusi tidak seimbang menggunakan ETAP 16.0 pada kondisi sistem seimbang yang terhubung DG dan kondisi tidak seimbang yang terhubung DG, Besar *Voltage Unbalance* yang dihasilkan simulasi ETAP 16.0 akan dibandingkan dengan perhitungan dengan MATLAB R2014a.

Dengan menggunakan metode *Backward Forward* pada jaringan distribusi tidak seimbang, didapat hasil tegangan dan arus yang berbeda tiap fasanya. Besar *voltage unbalance* setiap bus bernilai dibawah 1 %. Nilai dari hubung singkat pada sistem juga bervariasi tiap bus dan hasil dari simulasi MATLAB sudah mendekati nilai ETAP.

Kata kunci: *Voltage Unbalance*, *Distributed Generation*, Hubung Singkat.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

# **Unbalanced Distribution Network Distribution and Distributed Generation (DG) Model for Short Circuit Analysis.**

*Name* : Wiratama Tambunan  
*Supervisor 1* : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
*Supervisor 2* : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

## **ABSTRACT**

*To fulfill the supply of electricity to the consumer, in this case PLN must increase its operation. In an electrical system where the load increases from time to time, a resource is required that can supply the surrounding electrical power with the installation of Distributed Generation (DG). With increasing load, can cause imbalance between phases. This becomes a common problem that often occurs, so the voltage on the system becomes unbalanced between the phases. This condition is called Voltage Unbalance.*

*In an electrical system, an abnormal state will inevitably occur, one of which is interference. A common disorder is a short circuit. In this study will be simulated short circuit on unbalanced system. By using Single Line Diagram of Tegalsari distribution network, we can know the magnitude of Voltage Unbalance during steady state condition and know the big short circuit in unequal distribution network using ETAP 16.0 on balanced system condition connected DG and unbalance condition connected DG, Large Voltage Unbalance the resulting ETAP 16.0 simulation will be compared with the calculation with MATLAB R2014a.*

*By using Backward Forward method on unbalanced distribution network, we get different voltage and current result of each phase. Value voltage unbalance of each bus is less than 1%. Value from short circuit on the system also varies each bus and the result of MATLAB simulation is close to ETAP value.*

*Keywords: Voltage Unbalance, Distributed Generation, Short Circuit*

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat-Nya, penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul **PEMODELAN JARINGAN DISTRIBUSI TIDAK SEIMBANG DAN TERHUBUNG *DISTRIBUTED GENERATION* (DG) UNTUK ANALISIS HUBUNG SINGKAT** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Selama melaksanakan tugas akhir ini baik melakukan simulasi program maupun penyusunan buku tugas akhir ini banyak kendala, hambatan, dan rintangan yang penulis alami. Akan tetapi banyak pihak yang telah membantu penulis untuk menghadapi semua rintang tersebut. Tanpa dukungan mereka, sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Dan kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih, diantaranya:

1. Kepada kedua Orang tua tercinta, adik-adik kandung dan seluruh anggota keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing I dan II, yang telah memberikan banyak ilmu, arahan, dan motivasi dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen-dosen Departemen Teknik Elektro, yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
4. Seluruh ‘anggota Team S’, ‘asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga’ dan ‘asisten Laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga’ yang telah banyak membantu penulis untuk mengerjakan seluruh tugas akhir.
5. Teman-teman e54 yang selalu mendukung dan memberikan semangat kepada penulis.
6. Seluruh anggota kepengurusan UKM Basket ITS ‘EVOLUTION FAMILY 15/16’ dan ‘FUSION FAMILY 16/17’ yang telah berjuang bersama memajukan UKM Basket ITS.
7. Seluruh anggota ‘DinS’ yang telah memberikan motivasi dan keceriaan kepada penulis.
8. Octavian Nur Fauzi dan M. Syah Rheza sebagai satu rekan kerja praktek di TMMIN karawang selama 1 bulan.
9. Seluruh anggota ‘Dongan Sahuta” yang selalu menyemangati penulis ( Cici, Ivan, Tandy, Jackomar, Naomi, Imelda, dan Jeremi )

10. Teman-teman yang selalu menyemangati dan selalu membuat penulis tertawa ( Angga, Dwiki, Fernando, Grace, Kezia, Marintan, Nadha, Ricky, Weni, Boy, Judika, After, Rafael, Dillon, Kak Enny, Bang Dumoli, dan Maria)

Penulis sadar bahwa tugas akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang harus diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari seluruh pihak sangatlah membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut, terima kasih.

Surabaya, 13 Juli 2018

Wiratama Tambunan



## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan Peneliti .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik .....	5
2.2.1 Sistem Distribusi Radial .....	5
2.2.2 Sistem Distribusi <i>Loop</i> .....	6
2.2.3 Sistem Distribusi Mesh .....	7
2.2.4 Sistem Distribusi <i>Spindel</i> .....	8
2.3 Analisis Aliran Daya .....	9
2.3.1 Pendahuluan .....	9
2.3.2 Persamaan Aliran Daya .....	9
2.4 Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial .....	11
2.4.1 Pendahuluan .....	11
2.4.2 Metode Backward Forward .....	11
2.4.3 Metode Backward Forward pada Sistem Tidak Seimbang .....	14
2.5 Distributed Generation (DG) .....	17
2.6 <i>Voltage Unbalance</i> .....	18
2.7 Hubung Singkat ( <i>Short Circuit</i> ) .....	18
2.7.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah .....	19
2.7.2 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah .....	21
2.7.3 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	23
2.7.4 Hubung Singkat Fasa dengan Fasa .....	23
2.8 Pemodelan Hubung Singkat pada Sistem Distribusi 3	

Fasa Tidak Seimbang.....	25
BAB 3 PEMODELAN SISTEM.....	27
3.1 Pemodelan Sistem Distribusi Radial Tegalsari .....	27
3.2 Data Saluran, Beban, Grid dan Distributed Generation (DG) .....	28
3.3 Algorithma Analisis Hubung Singkat.....	31
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS .....	35
4.1 Hasil Analisis Aliran Daya.....	37
4.2 Hasil Analisis <i>Voltage Unbalance</i> .....	38
4.3 Hasil Analisis Hubung Singkat .....	44
4.3.1 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah.....	44
4.3.2 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah .....	45
4.3.3 Hubuug Singkat Tiga Fasa ke Tanah .....	47
4.3.4 Hubung Singkat Fasa dengan Fasa.....	49
4.3.5 Pembahasan Hasil Analisis Hubung Singkat .....	51
BAB 5 PENUTUP.....	53
5.1 Kesimpulan .....	53
5.2 Saran .....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	57
BIOGRAFI PENULIS.....	69

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial.....	6
Gambar 2.2 Sistem Distribusi <i>Loop</i> .....	7
Gambar 2.3 Sistem Distribusi Mesh .....	8
Gambar 2.4 Sistem distribusi <i>Spindel</i> .....	9
Gambar 2.5 Jaringan Sistem Tenaga Secara Sederhana.....	10
Gambar 2.6 Single line diagram distribusi radial sederhana.....	12
Gambar 2.7 Rangkaian beban 3 fasa.....	14
Gambar 2.8 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah .....	19
Gambar 2.9 Hubungan Urutan pada Hubung Singkat satu fasa ke tanah .....	20
Gambar 2.10 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah .....	21
Gambar 2.11 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.....	23
Gambar 2.12 Hubung Singkat Fasa dengan Fasa .....	24
Gambar 3.1 Sistem Jaringan Distribusi Tegalsari .....	27
Gambar 3.2 Diagram Blok Analisis Hubung Singkat (1) .....	31
Gambar 3.3 Diagram Blok Analisis Hubung Singkat (2) .....	32

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Distributed Generation (DG) Berdasarkan Kapasitas Pembangkit.....	18
Tabel 2.2 Jenis Distributed Generation (DG).....	18
Tabel 3.1 Data Impedansi Saluran Tegalsari.....	28
Tabel 3.2 Data Beban Tidak Seimbang Tegalsari .....	29
Tabel 3.3 Data Spesifikasi Gardu Induk, Distributed Generation, dan Kabel .....	30
Tabel 4.1 Hasil Tegangan Fasa Line-Line pada MATLAB .....	35
Tabel 4.2 Hasil Arus Fasa pada MATLAB .....	36
Tabel 4.3 Hasil Tegangan Line-Line pada ETAP .....	36
Tabel 4.4 Hasil Arus Fasa pada ETAP .....	37
Tabel 4.5 Data Error Magnitudo Tegangan Fasa R-S .....	38
Tabel 4.6 Data Error Magnitudo Tegangan Fasa S-T .....	38
Tabel 4.7 Data Error Magnitudo Tegangan Fasa T-R .....	39
Tabel 4.8 Hasil Voltage Unbalance Saat Terhubung DG .....	40
Tabel 4.9 Hasil Voltage Unbalance Saat Tidak Terhubung DG.....	42
Tabel 4.10 Hasil Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG .....	44
Tabel 4.11 Hasil Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG .....	45
Tabel 4.12 Hasil Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG .....	46
Tabel 4.13 Hasil Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG .....	46
Tabel 4.14 Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG .....	47
Tabel 4.15 Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG .....	48
Tabel 4.16 Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem Terhubung DG .....	49
Tabel 4.17 Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem tanpa Terhubung DG .....	50

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Seiring perkembangannya zaman, listrik telah menjadi kebutuhan pokok bagi semua orang, baik dikalangan bawah maupun kalangan atas. Dari waktu ke waktu, kebutuhan listrik meningkat drastis, sehingga besar daya pada beban perlu ditingkatkan lagi. Akan tetapi sangat sulit untuk membangun suatu pembangkit dengan skala besar dalam waktu yang singkat. Untuk memenuhi kebutuhan konsumen, pihak PLN haruslah memiliki solusi untuk meningkatkan operasi sistem kelistrikan dengan meningkatkan sumber daya listrik berskala kecil. Salah satu solusinya adalah dengan pemasangan beberapa *Distributed Generation (DG)* yang tersambung pada sistem kelistrikan jaringan distribusi [1].

Walaupun kapasitas beban telah diperbesar ketika DG telah dipasang, permasalahan umum yang sering terjadi adalah kondisi beban pada tiap fasanya tidak seimbang [2]. Daya yang tidak seimbang tiap fasanya dapat menyebabkan *Voltage Unbalance*. *Voltage Unbalance* ini dapat disebabkan oleh daya beban satu fasa berbeda dengan daya pada beban fasa yang lainnya, impedansi beban yang tidak sama pada tiap fasanya, ataupun tipe bebannya [3]. Apabila dalam sistem kelistrikan memiliki beban yang tidak seimbang, maka DG tersebut akan mendapatkan efeknya yaitu kualitas daya yang dikeluarkan tidak akan optimal [4].

Didalam sistem kelistrikan, kemungkinan terjadinya gangguan itu pasti ada, hanya saja kita tidak akan tahu kapan gangguan tersebut akan datang. Gangguan yang sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat ini bisa terjadi seperti hubung singkat antar fasa, satu fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, atau tiga fasa ketanah [5]. Apabila gangguan hubung singkat ini terjadi, maka seluruh sistem kelistrikan akan mendapatkan dampaknya. Jika hubung singkat terjadi pada Busbar DG dengan kondisi beban tidak seimbang, maka DG akan mendapatkan permasalahan yaitu tegangan pada Busbar DG menjadi tidak seimbang.

Untuk mengetahui kualitas daya tentang *Voltage Unbalance* pada sistem jaringan distribusi radial yang terhubung dengan DG, diperlukan studi analisis gangguan hubung singkat pada tiap bus.

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pola sistem kelistrikan pada jaringan distribusi Tegalsari ? (SLD yang digunakan adalah Tegalsari)
2. Berapa rating daya beban yang tidak seimbang pada jaringan distribusi Tegalsari ?
3. Bagaimana hasil arus pada sistem kelistrikan jaringan distribusi yang terhubung pada DG saat terjadi gangguan pada beban yang tidak seimbang ?
4. Bagaimana perhitungan *Voltage Unbalance* pada MATLAB R2014a ?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui jenis metode perhitungan pada aliran daya.
2. Mengetahui aliran daya sistem kelistrikan jaringan distribusi yang Terhubung dengan DG.
3. Mengetahui besar arus pada sistem kelistrikan jaringan distribusi yang terhubung pada DG saat kondisi beban yang tidak seimbang mengalami gangguan hubung singkat.
4. Membandingkan besar *Voltage Unbalance* pada tiap Busbar dengan simulasi ETAP 16.0 dengan perhitungan di MATLAB R2014a.

## 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa *Voltage Unbalance* pada saat *Load Flow* dalam kondisi Beban Tidak Seimbang.
2. Analisa magnitude arus pada saat gangguan hubung singkat dalam kondisi Beban Tidak Seimbang.
3. Hubung singkat yang digunakan adalah satu fasa ketanah, fasa ke fasa, dua fasa ketanah, dan tiga fasa ketanah.
4. Bandingkan hasil hubung singkat dalam keadaan beban tidak seimbang terhubung DG dengan beban tidak seimbang tidak terhubung dengan DG.
5. Beban yang digunakan pada sistem jaringan distribusi radial adalah 100 % beban statis.
6. Menggunakan Software ETAP 16.0 dan Matlab R2014a.



## 1.5. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### 1. Studi literatur

Studi literatur ini bertujuan sebagai penguasaan materi dalam Tugas Akhir ini. Sumber yang digunakan dari paper, jurnal, dan buku tentang sistem kelistrikan jaringan distribusi radial, *Distributed Generator* (DG), Hubung Singkat (*Short Circuit*), *Voltage Unbalance*. Setelah itu dilakukan pemodelan sistem kelistrikan pada ETAP 16.0.

### 2. Simulasi Aliran Daya dan Short Circuit pada ETAP 16.0

Setelah melakukan pemodelan jaringan distribusi radial dengan beban tidak seimbang dan terhubung dengan DG pada ETAP 16.0, akan dilakukan simulasi aliran daya dari sumber menuju beban dan dilakukan tes hubung singkat pada keseluruhan busbar. Hasil simulasi pada ETAP ini merupakan tolok ukur pada simulasi MATLAB R2014a.

### 3. Simulasi Aliran Daya dan Short Circuit pada MATLAB R2014a

Seluruh data-data yang ada pada ETAP 16.0 akan dimasukkan kedalam perhitungan pada MATLAB R2014a dan disimulasikan. Lalu hasil tegangan dari simulasi aliran daya dan hasil hubung singkat pada MATLAB R2014a akan dibandingkan dengan simulasi ETAP 16.0.

### 4. Analisis Program dan Data

Pada tahap ini akan dilakukan analisis terhadap program yang telah dibuat berdasarkan hasil simulasi. Apabila ditemukan kesalahan atau ketidaksamaan dengan hasil yang seharusnya, maka akan dilakukan perbaikan terhadap algoritma hingga hasil simulasi menunjukkan nilai yang sesuai. Setelah melakukan analisis terhadap program, dilakukan hasil analisis terhadap data yang telah diperoleh dengan hasil simulasi aktual yaitu analisis dengan ETAP 16.0

### 5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisa *Voltage Unbalance* dan analisa hubung singkat pada sistem jaringan distribusi radial tidak seimbang yang terhubung dengan DG.

### 6. Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Untuk tahapan terakhir, penulis akan menyusun seluruh laporan tugas akhir berdasarkan proses yang telah dilaksanakan dan hasil yang diperoleh dari simulasi disesuaikan dengan kaidah penulisan

Tugas Akhir.

## 1.6. Sistematika Penulisan

Dalam buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem yang dibuat terbagi menjadi Lima Bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

- Bab I : Pendahuluan  
Bab ini meliputi penjelasan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab II : Tinjauan Pustaka  
Bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang terkait pada pengerjaan simulasi. Dasar teori yang menunjang antara lain sistem jaringan distribusi radial, analisis aliran daya, aliran daya pada sistem jaringan ditribusi radial, *Distributed Generation*, *Voltage Unbalance*, dan hubung singkat. Selain itu, bagian ini juga berisi tinjauan pustaka dari beberapa penelitian sebelumnya menggunakan paper yang diambil dari IEEE.
- Bab III : Pemodelan Sistem  
Bab ini akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengerjaan dan pemodelan sistem jaringan yang akan disimulasikan menggunakan ETAP 16.0 dan MATLAB R2014a.
- Bab IV : Simulasi dan Analisis  
Bab ini menjelaskan tentang hasil simulasi dan analisisnya.
- Bab V : Kesimpulan  
Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari simulasi yang telah dilaksanakan serta saran untuk pengembangan lebih lanjut.

## 1.7. Relevansi

Dengan adanya penelitian pada Tugas Akhir ini, diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat dijadikan referensi dalam pengembangan pada DG yang disambungkan pada sistem jaringan distribusi radial.
2. Dapat digunakan sebagai acuan referensi penelitian hubung singkat pada sistem jaringan distribusi yang terhubung DG.
3. Dapat digunakan sebagai referensi penelitian Voltage Unbalance.
4. Dapat digunakan sebagai analisa perhitungan pada setting *Circuit Breaker*.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sistem Tenaga Listrik**

Secara umum, sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen penyaluran berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang berhubungan. Fungsi dari masing masing komponen tersebut adalah:

- a. Pembangkit : bagian yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik dengan cara mengubah energi lain seperti panas bumi, minyak bumi, air, angin, dan batubara menjadi energi listrik.
- b. Saluran transmisi : komponen yang menyalurkan daya listrik dari pembangkit ke gardu induk sebagai pusat beban dengan cara menaikkan tegangan menggunakan transformator step up untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran.
- c. Saluran Distribusi : setelah melalui saluran transmisi, daya listrik dialirkan ke gardu induk untuk diturunkan tegangannya menggunakan transformator daya dan mendistribusikan energi listrik tersebut ke konsumen energi listrik.
- d. Beban : merupakan konsumen yang menggunakan energi listrik dari sistem tenaga listrik.

Untuk memenuhi kebutuhan listrik pada konsumen, diperlukan peralatan-peralatan yang saling tersambung satu sama lain. Sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai pusat listrik yang saling terhubung membentuk sebuah interkoneksi sistem kelistrikan.

#### **2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

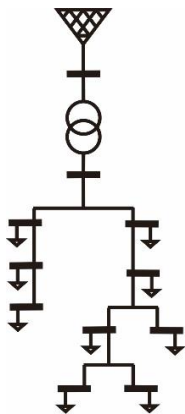
Sebelum saluran listrik sampai ke konsumen, sistem distribusi akan membagi daya listrik ke konsumen. Pada sistem distribusi tegangan yang digunakan adalah 20 Kv sebagai distribusi primer, lalu diturunkan lagi menjadi 220/380 Volt menggunakan transformator agar bisa dikonsumsi oleh konsumen rumah tangga. Terdapat juga industri-industri kecil yang membutuhkan tegangan 20 Kv sehingga pihak PLN tidak perlu menurunkan tegangan tersebut.

##### **2.2.1 Sistem Distribusi Radial**

Terdapat bermacam-macam bentuk jaringan pada sistem distribusi. Bentuk jaringan ini disebut topologi jaringan. Salah satu variasinya adalah sistem distribusi radial.

Sistem distribusi radial merupakan sistem yang paling sederhana dan ekonomis karena salurannya ditarik secara radial dari titik penyulang dan bebannya dapat bercabang-cabang sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Sistem distribusi radial ini sering digunakan karena titik sumber dengan beban hanya memiliki satu saluran dan tidak ada saluran alternatif lainnya.

Kekurangan dari topologi sistem distribusi radial ini adalah kurang handal karena hanya menggunakan satu sumber daya dan apabila terjadi gangguan, maka seluruh sistem distribusi akan mengalami kepadaman sepanjang jalur tunggal yaitu jalur yang terhubung dengan setiap beban dan gardu. Selain itu dalam hal kualitas daya, tegangan pada ujung saluran dari topologi jaringan ini kurang baik karena diujung saluran memiliki drop tegangan yang paling besar diantara saluran cabang yang lain. Hal ini disebabkan oleh besar impedansi dan nilai arus yang melewati saluran.



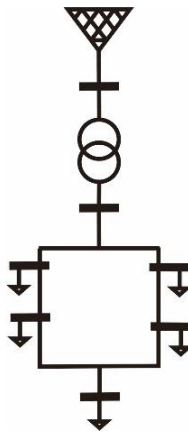
Gambar 2.1 Sistem Distribusi Radial

### 2.2.2 Sistem Distribusi *Loop*

Sistem distribusi *loop* merupakan bentuk topologi yang terhubung membentuk rangkaian yang tertutup dan memiliki satu sumber daya listrik. Dengan rangkaian tertutup, seluruh titik beban memiliki dua jalur suplai. Sistem jaringan ini menyerupai bentuk cincin (*ring*). Hasil dari sistem distribusi *loop* ini memiliki keandalan yang tinggi karena apabila terjadi gangguan disalah satu saluran, maka saluran yang lain dapat

menggantikan untuk menyalurkan daya listrik. Umumnya sistem distribusi *loop* ini digunakan pada beban yang membutuhkan keandalan yang tinggi seperti industri atau pabrik. Kualitas daya yang dihasilkan dari sistem distribusi *loop* ini jauh lebih baik karena drop tegangan yang disebabkan oleh impedansi saluran lebih kecil.

Kelemahan dari sistem distribusi *loop* ini adalah memiliki biaya investasi yang cukup mahal karena peralatan pengaman sistem tenaga listrik yang digunakan lebih kompleks dan koordinasi pengaman juga lebih rumit dikarenakan tiap saluran tersuplai dua arah.



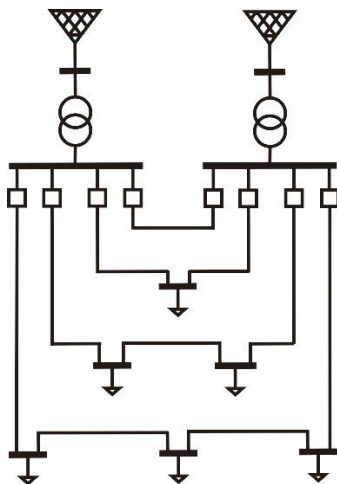
Gambar 2.2 Sistem Distribusi *Loop*

### 2.2.3 Sistem Distribusi Mesh

Sistem distribusi mesh adalah topologi distribusi yang mengkombinasikan sistem distribusi radial dengan sistem distribusi *loop* (*ring*). Sistem ini jauh lebih baik daripada sistem yang lain dikarenakan memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dan memiliki drop tegangan yang kecil dikarenakan sistem distribusi mesh dipasang dua atau lebih feeder pada gardu induk yang dipasang secara paralel. Sistem distribusi mesh ini lebih baik digunakan pada daerah yang memiliki tingkat kepadatan konsumen yang sangat tinggi.

Sistem distribusi mesh ini memiliki kelemahan yaitu perencanaan sistem kelistrikannya yang lebih rumit dan biaya investasi yang sangat tinggi serta pemeliharaan yang cukup rumit. Selain biaya yang cukup

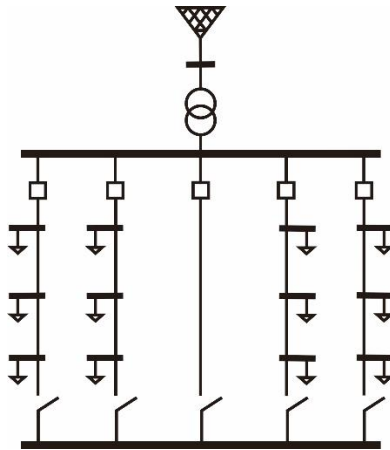
tinggi, koordinasi peralatan pengamannya juga sulit dikarenakan suplay daya pada suatu saluran bisa darimana saja.



Gambar 2.3 Sistem Distribusi Mesh

#### 2.2.4 Sistem Distribusi *Spindel*

Sistem distribusi *spindel* merupakan suatu pola dari gabungan sistem distribusi radial dan sistem distribusi loop yang terdiri dari beberapa penyulang (feeder) aktif yang sumber tegangannya dari gardu induk tersebut dan penyulang-penyulang tersebut berakhir dengan sebuah gardu hubung. Dengan menggunakan sistem ini merupakan salah satu cara meningkatkan keandalan suatu sistem distribusi. Dalam kondisi normal, semua saluran digardu induk hubung terbuka sehingga sistem beroperasi seperti jaringan radial. Sistem distribusi spindel ini sangat baik digunakan untuk mensuplai daerah beban yang cukup padat.



Gambar 2.4 Sistem Distribusi *Spindel*

## 2.3. Analisis Aliran Daya

### 2.3.1 Pendahuluan

Didalam teknik sistem tenaga, analisis aliran daya merupakan hal yang sangat penting dan paling mendasar. Umumnya analisis aliran daya digunakan pada perencanaan maupun pengembangan pada suatu sistem. Dari analisis aliran daya, kita bisa mendapatkan data dan informasi mengenai sistem yang dijadikan objek analisis tersebut. Semua informasi yang telah dibutuhkan, dapat kita evaluasi kinerja dan kondisi pembangkitan, penyaluran, dan pembebanan pada sistem tenaga listrik tersebut.

Data yang diperlukan terlebih dahulu untuk melakukan analisis aliran daya pada suatu sistem yaitu data saluran dan data beban sistem tenaga listrik serta tegangan sistem yang akan dipakai. Data saluran merupakan seluruh data nilai impedansi saluran yang menghubungkan setiap bus. Sedangkan data beban merupakan data daya aktif dan daya reaktif yang terhubung pada tiap bus.

### 2.3.2 Persamaan Aliran Daya

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang membangkitkan, menyalurkan, mengatur, membagi dan berakhirnya dengan menggunakan/memanfaatkan tenaga listrik tersebut. Daya listrik yang dibangkitkan oleh generator akan mengalir menuju ke semua beban yang

ada pada sistem tersebut. Dalam sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus saja, akan tetapi sistem tersebut terdiri dari puluhan bahkan ratusan bus yang saling terkoneksi satu sama lain.

Untuk mengetahui besarnya arus pada bus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Kirchoff arus. Sehingga persamaannya menjadi

$$I_i = y_{i0}V_i + y_i(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ = (y_{i0} + y_{i1} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - \dots - y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.1)$$

Untuk mengetahui nilai daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.2)$$

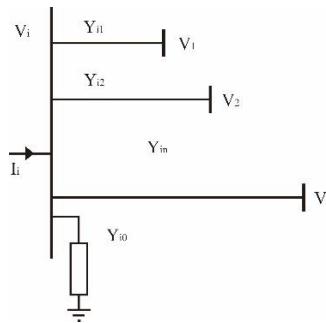
atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (2.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2 dan 3 menghasilkan persamaan

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.4)$$

Pada persamaan 2.4, dapat diketahui bahwa persamaan matematis aliran daya merupakan persamaan yang tidak linier, maka dari itu dibutuhkan iterasi untuk menyelesaikan persamaan tersebut.



Gambar 2.5 Jaringan Sistem Tenaga Secara Sederhana



## 2.4. Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial

### 2.4.1 Pendahuluan

Pada sistem tenaga, analisis aliran daya atau *power flow analysis* merupakan hal yang paling mendasar untuk melakukan perhitungan magnitude dan sudut phasa dari tegangan setiap bus serta aliran daya pada saluran baik daya aktif, daya reaktif maupun arus. Aliran daya ini juga dapat digunakan untuk mengetahui besar rugi-rugi saluran dan total daya aktif maupun daya reaktif pada penyulang. Analisis aliran daya pada sistem distribusi hampir sama dengan analisis aliran daya pada sistem transmisi.

### 2.4.2 Metode Backward-Forward

Pada sistem distribusi radial, metode *backward-forward* merupakan metode yang cocok untuk melakukan perhitungan aliran daya karena menggunakan karakteristik berdasarkan referensi cabang frame[6].

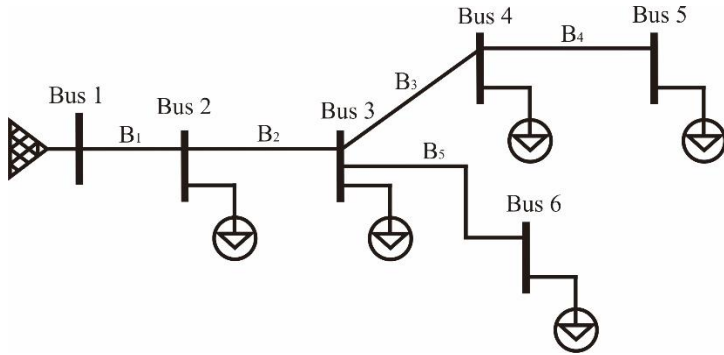
Metode ini banyak digunakan pada sistem radial dan rasio R/X yang tinggi. Banyak dilakukan pengembangan terhadap penelitian yang menggunakan metode ini yang bertujuan untuk mempercepat proses perhitungan dan mengakomodir perhitungan beban tiga fasa yang tidak seimbang.

Untuk melakukan analisis jaringan tenaga listrik langkah pertama yang dilakukan adalah pemodelan matematis. Teori Graph pertama kali dikenalkan oleh Leonhard Euler pada tahun 1736. Teori Graph mudah digunakan untuk menunjukkan hubungan antara objek. Teori ini mengacu pada node dan elemen yang menghubungkan antara node yang juga akan digunakan pada metode *backward forward*.

Metode *backward-forward* ini berdasarkan dari frame cabang sebagai referensi. Dari frame cabang, didapat matriks impedansi cabang dan teknik injeksi arus. Dengan menggunakan teori graph, pembuatan matriks K dapat digunakan dengan mudah. Metode ini diawali dengan mencari besar arus pada setiap saluran menggunakan persamaan daya:

$$I_i = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad (2.5)$$

Dimana  $I_i$ ,  $P_i$ ,  $Q_i$ , dan  $V_i$  adalah nilai arus, daya aktif, daya reaktif, dan tegangan pada bus  $i$ .



Gambar 2.6 *Single line diagram* distribusi radial sederhana

Pada gambar 2.6, merupakan sebuah sistem distribusi yang sederhana yang arusnya menyuplai beban melewati jalur tertentu. Dengan menggunakan persamaan (2.5) akan didapatkan arus pada setiap bus, dan dengan hukum Kirchoff, akan didapat nilai arus setiap saluran.

$$\begin{aligned}
 B_5 &= I_6 \\
 B_4 &= I_5 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Dari persamaan diatas disebut persamaan injeksi arus. Persamaan ini dapat diubah ke dalam matriks injeksi arus atau BIBC (*Bus Injection to Branch Current*).

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}
 \tag{2.7}$$

Dari persamaan matriks diatas, dapat disederhanakan menjadi model persamaan dengan komponen matriks BIBC.

$$[B] = [BIBC][I]
 \tag{2.8}$$

Pada setiap saluran terdapat impedansi yang akan menghasilkan drop tegangan. Besar drop tegangan ini dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang berasal dari hukum Kirchoff.

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_3 &= V_2 - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_4 &= V_3 - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_5 &= V_4 - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_6 &= V_3 - B_5 \cdot Z_{26}
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Dengan mensubstitusi setiap persamaan diatas, maka akan diperoleh hasil persamaan baru

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_3 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_4 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_5 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_6 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{26}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Dengan memindahkan seluruh komponen tegangan ke ruas sebelah, maka hasil persamaan menjadi

$$\begin{aligned}
 V_1 - V_2 &= B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_1 - V_3 &= B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_1 - V_4 &= B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_1 - V_5 &= B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_1 - V_6 &= B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{26}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Persamaan ini dapat dibentuk menjadi matriks dengan komponen matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*)

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}
 \tag{2.12}$$

Persamaan matriks diatas diperoleh hasil drop tegangan pada setiap bus. Matriks ini dapat disederhanakan menjadi

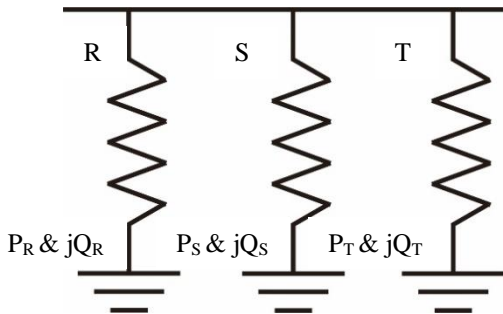
$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.13)$$

Persamaan matriks B dapat disubstitusikan ke persamaan matriks  $\Delta V$  sehingga didapat persamaan berikut

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.14)$$

#### 2.4.3 Metode *Backward-Forward* pada Sistem 3 Fasa Tidak Seimbang

Pada umumnya, metode *Backward Forward* ini digunakan pada aliran daya 3 fasa seimbang. Karena tiap fasanya seimbang, aliran daya ini dianggap 1 fasa pada perhitungan. Untuk pemodelan sistem jaringan tidak seimbang, aliran dayanya tetap menggunakan 1 fasa, akan tetapi perhitungannya akan berbeda dengan fasa yang lain dikarenakan besar daya aktif dan reaktif berbeda tiap fasanya[10].



Gambar 2.7 Rangkaian beban 3 fasa

Dengan menggunakan seluruh persamaan pada sub bab 2.4.3, maka tiap fasa pada beban akan mendapatkan nilai arus dan tegangan yang berbeda.

Untuk mendapatkan besar arus dan tegangan tiap bus pada sistem 3 fasa, maka akan terbentuk 3 matriks BIBC dan BCBV. Dengan menggunakan contoh *single line diagram* pada gambar 2.6, matriks BIBC pada sistem menjadi

$$\text{Fasa R} \quad \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\text{Fasa S} \quad \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\text{Fasa T} \quad \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Dikarenakan sistem yang tidak seimbang tiap fasanya, maka besar arus tiap fasa akan berbeda. Dengan menggunakan persamaan 2.5, tiap fasa akan didapat besar arus yang mengalir.

$$I_R = \left( \frac{P_R + jQ_R}{V_i} \right)^* \quad (2.18)$$

$$I_S = \left( \frac{P_S + jQ_S}{V_i} \right)^* \quad (2.19)$$

$$I_T = \left( \frac{P_T + jQ_T}{V_i} \right)^* \quad (2.20)$$

Hasil perhitungan besar arus tiap fasa, akan dimasukkan ke persamaan matriks 2.15 untuk fasa R, 2.16 untuk fasa S, dan 2.17 untuk fasa T. Dari persamaan matriks tersebut, dapat disederhanakan menjadi

$$[B_{fasa R}] = [BIBC][I_R] \quad (2.21)$$

$$[B_{fasa S}] = [BIBC][I_S] \quad (2.22)$$

$$[B_{fasa T}] = [BIBC][I_T] \quad (2.23)$$

Untuk mendapatkan besar tegangan disetiap bus pada sistem 3 fasa yang tidak seimbang, matriks BCBV menjadi

$$\text{Fasa R} \quad \begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\text{Fasa S} \quad \begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\text{Fasa T} \quad \begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Matriks diatas dapat disederhanakan menjadi

$$[\Delta V_{fasa R}] = [BCBV][B_{fasa R}] \quad (2.27)$$

$$[\Delta V_{fasa S}] = [BCBV][B_{fasa S}] \quad (2.28)$$

$$[\Delta V_{fasa T}] = [BCBV][B_{fasa T}] \quad (2.29)$$

Dengan persamaan 2.27, 2.28, dan 2.29, akan didapat nilai tegangan yang berbeda tiap fasa pada bus.

Untuk membuat aliran daya pada metode *backward forward* menjadi 3 fasa, matriks BIBC dan BCBV dari fasa R, fasa S dan fasa T dapat digabung menjadi matriks dibawah ini.

$$\begin{bmatrix} B_{1 \text{ fasa R}} \\ B_{1 \text{ fasa S}} \\ B_{1 \text{ fasa T}} \\ B_{2 \text{ fasa R}} \\ B_{2 \text{ fasa S}} \\ B_{2 \text{ fasa T}} \\ B_{3 \text{ fasa R}} \\ B_{3 \text{ fasa S}} \\ B_{3 \text{ fasa T}} \\ B_{4 \text{ fasa R}} \\ B_{4 \text{ fasa S}} \\ B_{4 \text{ fasa T}} \\ B_{5 \text{ fasa R}} \\ B_{5 \text{ fasa S}} \\ B_{5 \text{ fasa T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Dengan menggunakan matriks diatas, nilai arus dan tegangan di tiap fasa pada beban dapat diperoleh. Tiap kolom, dan baris harus diberi nilai 0 untuk memisahkan antara fasa.

## 2.5. Distributed Generation (DG)

*Distributed Generator (DG)* adalah suatu pembangkit listrik berskala kecil yang dipasang pada sistem distribusi dengan posisi yang dekat pada beban. Karena letaknya yang dekat dengan beban memungkinkan DG untuk membantu mensuplai daya pada beban yang jauh dari pembangkit utama.

Macam-macam DG yang umum digunakan adalah *Photovoltaic*, *Micro hidro*, *Battery*, *Diesel* dan *Wind turbine* dan memiliki kapasitas pembangkitan yang berbeda-beda (maksimal kapasitas pembangkitan DG 300 MW). DG ini dipasang pada sisi jaringan pelanggan yang bertujuan untuk mensuplai tegangan dan daya dan menghindari terjadinya pemadaman pada beban yang disekitar DG [1], [7].

**Tabel 2.1.** Klasifikasi Distributed Generation (DG) Berdasarkan Kapasitas Pembangkit [2].

<b>Klasifikasi <i>Distributed Generation</i></b>	<b>Kapasitas Pembangkitan (KW)</b>
Micro DG	1 Watt - % KW
Small DG	5 KW – 5 MW
Medium DG	5 MW – 50 MW
Large DG	50 MW – 300 MW

**Tabel 2.2** Jenis Distributed Generation (DG) [7].

<b>Jenis <i>Distributed Generation</i></b>	<b>Kapasitas (KW)</b>
Diesel Engine	20 – 10.000 + KW
Gas Engine	50 – 5000 + KW
Gas Turbine	1000 + KW
Micro-Turbine	30 – 200 KW
Fuel Cell	50 – 1000 + KW
Photo-voltaic	1 + KW

## 2.6. Voltage Unbalance

*Voltage Unbalance* adalah suatu permasalahan dalam kualitas daya listrik yang disebabkan oleh distribusi beban yang tidak seimbang tiap fasanya dan power supply yang tidak seimbang dan tidak stabil. Umumnya, *voltage unbalance* terjadi karena beban yang tidak seimbang antar fasanya. Ketidakseimbangan pada tegangan ini paling sering dijumpai pada sistem distribusi. Voltage Unbalance dapat diartikan sebagai penyimpangan besar tegangan dari yang seharusnya. Sesuai standar NEMA, *Voltage Unbalance* dapat dinyatakan dalam bentuk persen dengan rumus dibawah ini [3].

$$\text{Voltage Unbalance} = \frac{\text{Mean Tegangan} - \text{Minimum Tegangan}}{\text{Mean Tegangan}} * 100\% \quad (2.31)$$

## 2.7. Hubung Singkat (Short Circuit)

Didalam sistem kelistrikan, gangguan itu merupakan hal yang pasti terjadi. Hubung singkat merupakan suatu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik sehingga kondisi sistem kelistrikan menjadi abnormal dan mengganggu kontinuitas suplai daya [8]. Gangguan hubung singkat sering terjadi pada sistem distribusi. Gangguan hubung singkat

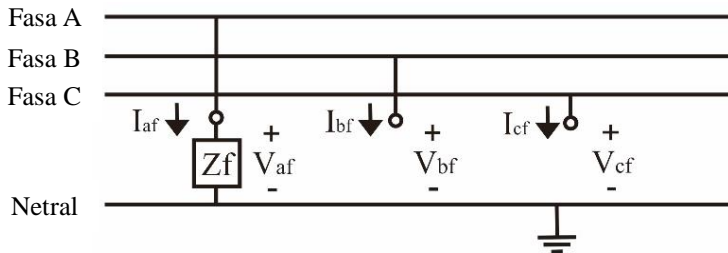


yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik ada 4 yaitu [9]:

1. Hubung singkat satu fasa ke tanah
2. Hubung singkat dua fasa ke tanah
3. Hubung singkat tiga fasa ke tanah
4. Hubung singkat fasa dengan fasa

### 2.7.1 Hubung Singkat Satu Fasa

Hubung singkat satu fasa merupakan gangguan yang paling sering terjadi dibandingkan jenis hubung singkat yang lainnya pada sistem kelistrikan. Hal ini diakibatkan karena adanya satu fasa yang bersentuhan ke tanah. Gangguan ini termasuk gangguan yang tidak simetri atau disebut asimetri.



Gambar 2.8 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Dari gambar 2.7, gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di fasa a menyebabkan arus fasa b dan fasa c sama dengan nol. Untuk fasa a, mengalir arus menuju tanah melalui impedansi gangguan  $Z_f$ . Apabila fasa netral pada generator atau grid atau transformer pada sistem pentanahannya solid, maka nilai  $Z_f$  adalah nol. Untuk tegangan pada fasa yang menuju tanah, menggunakan persamaan

$$V_f = Z_f \cdot I_{af} \quad (2.32)$$

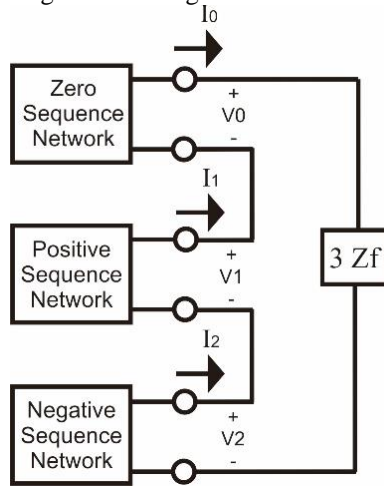
Untuk hubung singkat satu fasa, arus urutan positif, arus urutan negatif dan arus urutan nol akan muncul. Untuk mengetahui besar arus urutan positif, negatif dan nol, dapat menggunakan persamaan

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_a}{Z_{th0} + Z_{th1} + Z_{th2} + 3Z_f} \quad (2.33)$$

Untuk besar tegangan dari urutan positif, negatif, dan nol dari hubung singkat satu fasa ketanah menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} V_1 &= E_1 - I_1 Z_{th1} \\ V_2 &= -I_1 Z_{th2} \\ V_0 &= -I_0 Z_{th0} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Pada hubung singkat satu fasa ketanah, impedansi pengganti didapatkan dengan menenggunakan rangkaian pengganti thevenin. Lalu impedansi thevenin pada ketiga urutan digabung secara seri seperti gambar di bawah. Pada sistem kelistrikan secara umum, nilai impedansi urutan positif sama dengan urutan negatif.



Gambar 2.9 Hubungan Urutan pada Hubung Singkat satu fasa ke tanah

Untuk mengetahui nilai magnitude arus dan tegangan pada setiap fasa, kita dapat menggunakan matriks transformasi simetris atau *symmetrical components transformation matrix* (SCTM)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

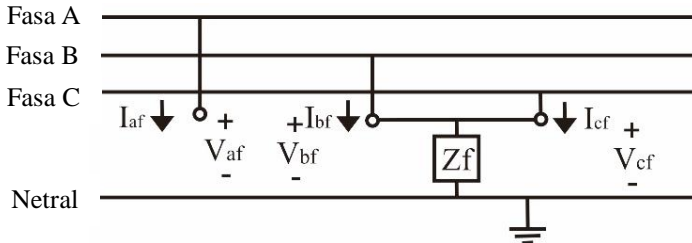
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Nilai  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  adalah arus pada fasa a, b, dan c secara urut, sedangkan  $I_{a0}$ ,  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  adalah arus urutan nol, positif, dan negatif pada fasa a yang terjadi hubung singkat secara urut. Notasi seperti ini berlaku juga pada persamaan tegangan diatas. Nilai  $a$  pada persamaan diatas adalah

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 + j0.866 \end{aligned} \quad (2.37)$$

### 2.7.2 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Hubung singkat dua fasa ketanah merupakan gangguan yang kedua fasanya terhubung ke tanah. Gangguan ini termasuk gangguan tidak simetri (asimetri) [8].



Gambar 2.10 Hubung Singkat Dua Fasa ke tanah

Dari gambar diatas, gangguan yang terjadi dicontohkan pada fasa b dan fasa c. Nilai fasa  $I_{af}$  sama dengan nol. Besar tegangan pada fasa yang terganggu dapat menggunakan persamaan

$$V_{bf} = V_{cf} = (I_{bf} + I_{cf})Z_f \quad (2.38)$$

$$I_{af} = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \quad (2.39)$$

Subtitusikan hasil turunan dari persamaan (2.38) ke dalam persamaan (2.36) menjadi

$$\begin{aligned} V_b &= V_c \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2 \\ V_a^1 &= V_a^2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Substitusi arus  $I_{bf}$  dan  $I_{cf}$  pada persamaan (2.38) dengan persamaan (2.36), maka akan didapatkan persamaan

$$\begin{aligned} V_{bf} &= Z_f(I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^1 + I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2) \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= Z_f(2I_a^0 - I_a^1 - I_a^2) \\ V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 &= 3Z_f I_a^0 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Pada persamaan (2. 40) akan disubstitusi ke persamaan (2.41)

$$\begin{aligned} V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^1 &= 3Z_f I_a^0 \\ V_a^0 + V_a^1(a^2 + a) &= 3Z_f I_a^0 \\ V_a^0 - V_a^1 &= 3Z_f I_a^0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Persamaan (2.34) akan disubstitusi ke persamaan (2.42) sehingga menghasilkan persamaa baru

$$I_a^0 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^0 + 3Z_f} \quad (2.43)$$

Dengan persamaan yang sama disubtitusikan ke dalam persaman (2.40) maka diperoleh persamaan

$$I_a^2 = -\frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^2} \quad (2.44)$$

Dari persamaan (2.43) dan persamaan (2.44) akan disubstitusi ke persamaan (2.39)

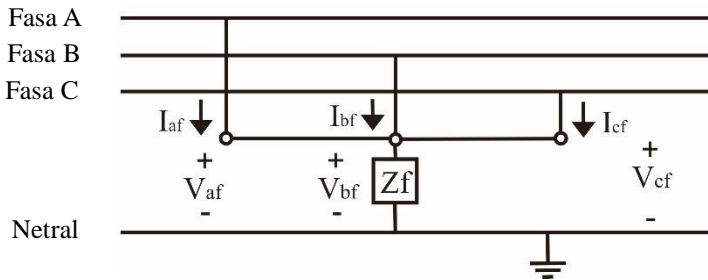
$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + \frac{Z^2(Z^0 + 3Z_f)}{Z^2 + Z^0 + 3Z_f}} \quad (2.45)$$

Saat nilai arus untuk semua urutan telah didapat, maka dapat dicari tegangan setiap urutan dengan persamaan yang digunakan pada hubung singkat satu fasa ketanah. Dengan menggunakan matriks SCTM, nilai tiap fasa baik arus maupun tegangan dapat diperoleh, sehingga arus hubung singkat dapat diperoleh dengan menggunakan rumus

$$I_f = I_b + I_c \quad (2.46)$$

### 2.7.3 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Hubung singkat tiga fasa ketanah merupakan gangguan yang terjadi pada ketiga fasanya yang bersentuhan ketanah. Gangguan ini termasuk gangguan simetris. Kejadian yang berhubungan dengan hubung singkat tiga fasa sangat jarang terjadi karena kemungkinan terjadinya sangatlah kecil dibandingkan dengan jenis kejadian hubung singkat lainnya.



Gambar 2.11 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah.

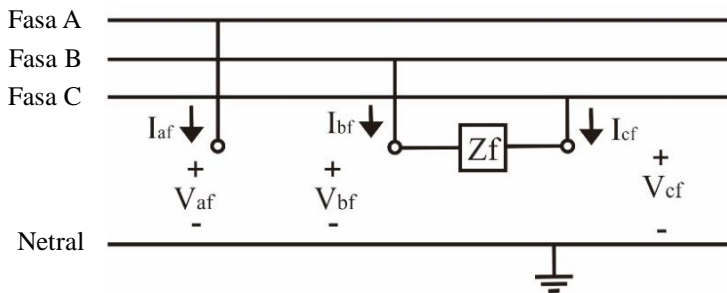
Pada gambar diatas, besar arus dan tegangan yang terjadi tiap fasanya akan bernilai sama.

$$I_{ia} = I_{ib} = I_{ic} = \frac{V_i}{Z_{ii} + Z_f} \quad (2.47)$$

Pada persamaan (2.47), notasi  $a, b,$  dan  $c$  menandakan fasa, notasi  $i$  menandakan bus yang terjadi hubung singkat tiga fasa.

### 2.7.4 Hubung Singkat Fasa dengan Fasa

Hubung singkat fasa dengan fasa dapat terjadi karena ada penghantar fasa yang bersentuhan dengan fasa lain secara langsung. Jenis gangguan ini merupakan gangguan tidak seimbang (asimetri).



Gambar 2.12 Hubung Singkat Fasa dengan Fasa

Pada jenis gangguan ini, arus urutan nol tidak muncul karena tidak ada hubungan ke tanah, hanya ada arus urutan positif dan negatif yang terjadi.

$$\begin{aligned} I_{af} &= 0 \\ I_{bf} &= -I_{cf} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Persamaan (2.48) diatas diubah ke dalam persamaan arus urutan dengan menggunakan matriks SCTM. Persamaan didapat menjadi

$$I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \quad (2.49)$$

Karena tidak ada arus urutan nol,  $I_a^0 = 0$ . Persamaan (2.49) menjadi

$$\begin{aligned} (a^2 - a)I_a^1 &= (a - a^2)I_a^2 \\ I_a^1 &= -I_a^2 \end{aligned} \quad (2.50)$$

Untuk mencari arus urutan positif, maka kita dapat menggunakan rumus

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (2.51)$$

Persamaan (2.51) disubstitusi ke persamaan (2.48) untuk mendapatkan arus urutan negatif.

$$-I_a^2 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (2.52)$$

## 2.8 Pemodelan Hubung Singkat pada Sistem Distribusi 3 Fasa Tidak Seimbang

Pada pemodelan hubung singkat, digunakan karakteristik dari matriks BIBC. Pada aliran daya 3 fasa menggunakan *backward forward*, matriks BIBC tiap fasa akan digabungkan dan akan menjadi seperti matriks dibawah.

$$\begin{bmatrix} B_{1 \text{ fasa } R} \\ B_{1 \text{ fasa } S} \\ B_{1 \text{ fasa } T} \\ B_{2 \text{ fasa } R} \\ B_{2 \text{ fasa } S} \\ B_{2 \text{ fasa } T} \\ B_{3 \text{ fasa } R} \\ B_{3 \text{ fasa } S} \\ B_{3 \text{ fasa } T} \\ B_{4 \text{ fasa } R} \\ B_{4 \text{ fasa } S} \\ B_{4 \text{ fasa } T} \\ B_{5 \text{ fasa } R} \\ B_{5 \text{ fasa } S} \\ B_{5 \text{ fasa } T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & S & T & R & S & T & R & S & T & R & S & T & R & S & T \\ \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Pada matriks diatas diagonalnya bernilai 1 (berwarna merah), nilai ini akan dijadikan sebagai tempat lokasi bus dan fasa yang akan terjadi hubung singkat. Nilai hubung singkat yang didapat dari persamaan, akan di masukkan ke persamaan matriks 2.53. Jika yang digunakan hubung singkat satu fasa, maka harus ada pemilihan salah satu pada fasa yang akan terjadi hubung singkat. Begitu juga untuk dua fasa ke tanah dan fasa kefasa, harus ada dua fasa yang akan terjadi hubung singkat. Untuk tiga fasa ketanah, ketiga fasanya akan digunakan sebagai hubung singkat. Dengan menggunakan matriks diatas, akan dikali dengan nilai perhitungan hubung singkat. Persamaan matriks diatas yang telah dikali dengan perhitungan hubung singkat dapat disederhanakan menjadi persamaan dibawah ini

$$[B] = [BIBC][I_{SC}] \quad (2.54)$$

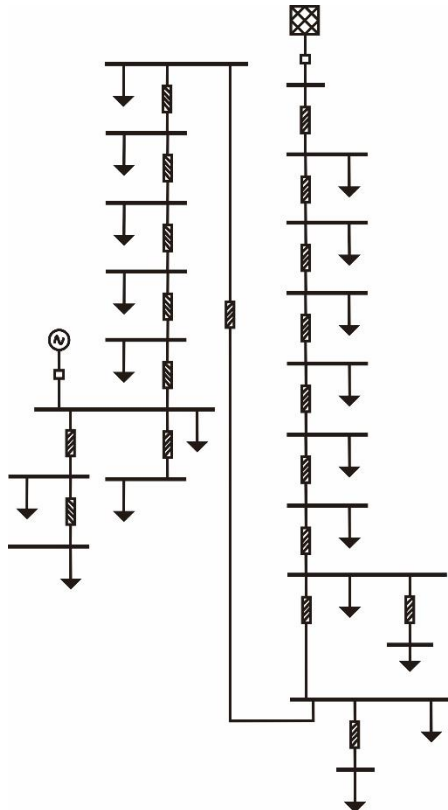
.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....



## BAB III PEMODELAN SISTEM

### 3.1. Pemodelan Sistem Distribusi Radial Tegalsari

Pada tugas akhir yang dikerjakan merupakan konfigurasi dari sistem distribusi radial dengan kondisi beban tidak seimbang yang beban antar fasanya tidak sama. Untuk mengetahui besar *voltage unbalance* pada saat sistem steady state dan mengetahui besar hubung singkat, diperlukan data sistem kelistrikan berupa besar daya pada tiap beban, besar impedansi saluran, besar daya dari grid, dan besar daya dari *distributed generation* (DG).



Gambar 3.1 Sistem Jaringan Distribusi Tegalsari

### 3.2. Data Saluran, Beban, Grid dan *Distributed Generation* (DG)

Sistem yang digunakan menggunakan 20 bus dengan level tegangan 20 Kv. Pada gambar 3.1 merupakan single line diagram dari jaringan distribusi radial tegalsari. Besar impedansi saluran kabel antara bus satu dengan yang lainnya berbeda beda karena kabel tersebut memiliki panjang tertentu. Pada tabel 3.1 merupakan data impedansi.

**Tabel 3.1** Data Impedansi Saluran Tegalsari

Dari Bus	Ke Bus	Resistansi (R)	Reaktansi (x)
1	2	0,01339	0,00657
2	3	0,04938	0,02423
3	4	0,02168	0,01063
4	5	0,01013	0,00497
5	6	0,04017	0,01971
6	7	0,01272	0,00624
7	8	0,05591	0,02743
8	9	0,01325	0,0065
8	10	0,05456	0,02676
10	11	0,07172	0,03518
10	12	0,15021	0,07369
12	13	0,06606	0,03241
13	14	0,00833	0,00409
14	15	0,06426	0,03152
15	16	0,00885	0,00434
16	17	0,01709	0,00838
17	18	0,0265	0,013
17	19	0,00595	0,00292
19	20	0,00893	0,00438

Untuk sistem distribusi, terdapat transformator daya yang akan mengubah tegangan dari 20 Kv menjadi 220/380 untuk dapat dikonsumsi

oleh pelanggan listrik. Data pada tabel 3.2 merupakan data beban yang dibebani oleh trafo daya dalam kondisi tidak seimbang.

**Tabel 3.2** Data Beban Tidak Seimbang Tegalsari

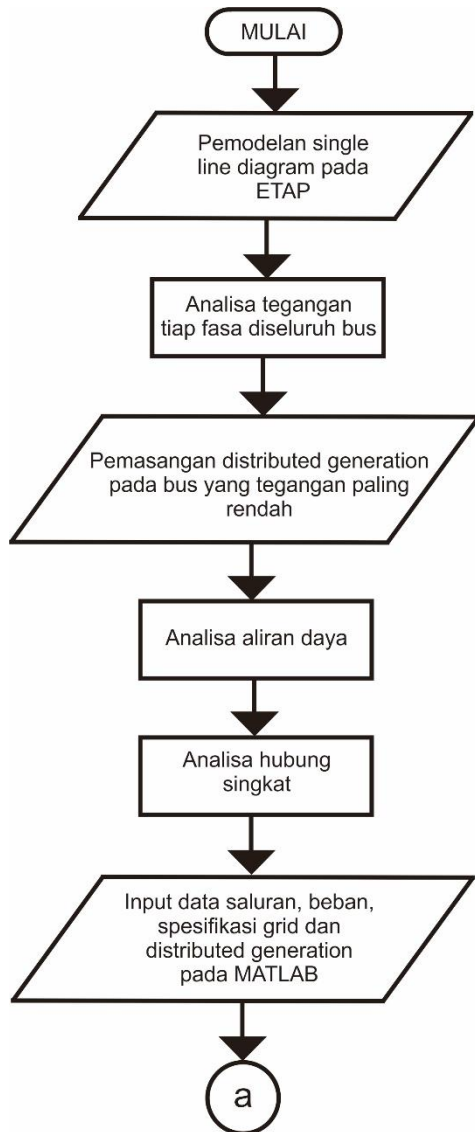
Bus	Daya Beban Tidak Seimbang					
	Fasa R		Fasa S		Fasa T	
	P (MW)	Q (MW)	P (MW)	Q (MW)	P (MW)	Q (MW)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,115	0,065	0,047	0,029	0,009	0,005
3	0,216	0,071	0,067	0,014	0,023	0,003
4	0,104	0,024	0,067	0,033	0,019	0,018
5	0,107	0,011	0,03	0,018	0,009	0,006
6	0,142	0,036	0,037	0,012	0,012	0,007
7	0,174	0,0283	0,024	0,017	0,011	0,008
8	0,173	0,05	0,071	0,025	0,025	0,012
9	0,147	0,043	0,027	0,013	0,009	0,006
10	0,112	0,069	0,048	0,03	0,023	0,014
11	0,151	0,038	0,068	0,037	0,021	0,016
12	0,186	0,13	0,101	0,076	0,01	0,01
13	0,23	0,098	0,059	0,025	0,02	0,012
14	0,113	0,04	0	0,002	0	0
15	0,139	0,046	0,018	0,006	0,007	0,005
16	0,124	0,063	0,014	0,006	0	0
17	0,231	0,047	0,047	0,034	0,012	0,011
18	0,115	0,161	0,038	0,037	0,004	0,003
19	0,221	0,031	0,043	0,034	0,013	0,009
20	0,101	0,084	0,0144	0,006	0,007	0,007

Pada sistem distribusi ini, terdapat data grid sebagai suplai daya ke sistem jaringan kelistrikan dan sebuah *distributed generation* serta data kabel, berikut datanya.

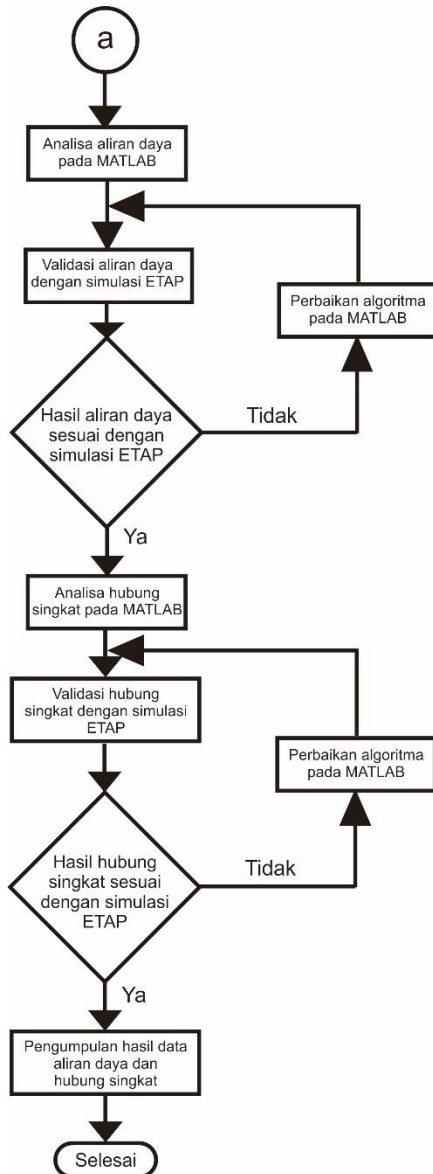
**Tabel 3.3** Data Spesifikasi Gardu Induk, Distributed Generation, dan Kabel

<b>Data</b>	<b>Nilai</b>
<b>1. Gardu Induk</b>	
Tegangan Line-Line	20Kv
MVAsc 3fasa	100
MVAsc 1fasa	33,3
X/R	10
<b>2. Distributed Generation</b>	
Tegangan Line-Line	20 KV
Machine Power	2 MW
Power Factor	0,85
X1	19
X2	18
X0	7
<b>3. Kabel</b>	
Tipe	XLPE
Luas Penampang	150 mm <sup>2</sup>
R urutan Positif & negatif	0,265 $\Omega$ /Km
R urutan nol	0,42 $\Omega$ /Km
X urutan positif & negatif	0,13 $\Omega$ /Km
X urutan nol	0,33 $\Omega$ /Km

### 3.3. Algoritma Analisis Hubung Singkat



Gambar 3.2 Diagram Blok Analisis Hubung Singkat [1]



Gambar 3.3 Diagram Blok Analisis Hubung Singkat [2]

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, ada beberapa langkah yang harus dilakukan untuk melakukan analisa hubunug singkat pada sistem jaringan distribusi radial tegalsari. Pada langkah pertama yaitu memodelkan sistem kelistrikan tegalsari pada ETAP 16.0 dengan data saluran, beban, dan spesifikasi grid. Beban yang dipermodelkan yaitu beban tidak seimbang dengan 100% statis. Tujuan dari pemodelan beban tidak seimbang ini adalah apakah dengan beban yang tidak sama antar fasanya ada perbedaan hubung singkat pada tiap fasanya. Selain itu juga kita perlu mengetahui besar persen *voltage unbalance* yang terjadi pada tiap bus. Setelah melakukan pemodelan pada ETAP, kita menganalisa tegangan tiap fasa diseluruh bus untuk mendapatkan *voltage unbalance*. Pada saat kita menganalisa tegangan pada sistem distribusi, terdapat bus yang tegangannya paling rendah diantara bus-bus lain. Untuk posisi bus yang mengalami penurunan tegangan paling besar akan dipasang *distributed generation* (DG). Setelah dilakukan pemasangan DG, akan dilakukan analisa aliran daya. Saat setelah dipasangnya DG ke sistem, masih tetap terjadinya tegangan tidak seimbang antar fasanya (*voltage unbalance*).

Langkah setelah mengetahui aliran daya yaitu menganalisis hubung singkat pada tiap bus dengan satu fasa ketanah, dua fasa ketanah, tiga fasa ketanah, dan fasa dengan fasa. Pada ETAP 16.0, kita dapat mensimulasikan satu fasa ketanah, dua fasa ketanah, dan fasa dengan fasa dengan memasukkan fasa yang akan di uji coba untuk hubung singkat. Pada saat simulasi satu fasa ketanah, hasil dari fasa R sama dengan fasa S dan fasa T. Percobaan ini dilakukan juga dengan dua fasa ketanah dan fasa dengan fasa menghasilkan hasil yang sama dengan percobaan tiap fasanya.

Saat setelah melakukan simulasi dengan ETAP, kita akan melakukan perhitungan dengan MATLAB. Seluruh data saluran, beban, dan spesifikasi grid dan DG dimasukkan kedalam program MATLAB yang telah dimodifikasi sebelumnya. Setelah melakukan input data, akan dilakukan analisis aliran daya pada MATLAB. Metode yang digunakan untuk melakukan perhitungan aliran daya adalah *backward forward*. Metode ini sangat cocok digunakan untuk sistem kelistrikan radial. Hasil dari simulasi MATLAB akan divalidasi dengan simulasi ETAP. Apabila hasil aliran daya pada MATLAB dengan simulasi ETAP jauh, maka akan diadakan perbaikan algoritma pada MATLAB. Bila hasil aliran daya sudah mendekati simulasi ETAP, maka akan dilakukan pengumpulan data aliran daya untuk mengetahui besar *voltage unbalance* pada tiap bus.

Setelah dilakukan pengumpulan hasil analisis aliran daya, akan dilakukan analisis hubung singkat pada MATLAB. Pada simulasi ini akan dilihat besar arus yang terjadi hubung singkat pada bus. Setelah dilakukan simulasi, akan dilakukan validasi dengan simulasi ETAP. Pada simulasi ETAP dan MATLAB, akan dilihat arus kontribusi hubung singkat pada sumber/grid, DG, saluran dan beban. Apabila hasil hubung singkat tidak sesuai dengan simulasi ETAP, maka akan diadakan perbaikan algoritma pada MATLAB. Bila hasil hubung singkat sesuai atau mendekati hasil simulasi ETAP, maka akan dilakukan pengumpulan hasil data aliran daya dan hubung singkat.

Untuk tugas akhir ini, akan disimulasikan pada saat kondisi beban tidak seimbang terhubung DG dan dibandingkan dengan kondisi beban tidak seimbang tidak terhubung DG.



## BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

### 4.1. Hasil Analisis Aliran Daya

Pada sistem distribusi Tegalsari tidak seimbang akan disimulasikan pada MATLAB. Langkah pertama yaitu melakukan analisis aliran daya menggunakan metode *backward forward*. Hasil dari MATLAB akan menunjukkan besar tegangan dan arus yang ada pada setiap bus. Dari hasil tersebut, akan diperoleh juga hasil daya yang mengalir pada beban. Tabel 4.1 merupakan hasil simulasi aliran daya.

**Tabel 4.1** Hasil Tegangan Fasa Line-Line pada MATLAB

Tegangan (Line-Line) (Kv)						
Bus	Fasa R-S	Sudut	Fasa S-T	Sudut	Fasa T-R	Sudut
1	20	0	20	-120	20	120
2	19,99864	-0,002	20,0005	-119,999	20,0011	120,002
3	19,99405	-0,008	20,0025	-119,997	20,0051	120,007
4	19,99235	-0,011	20,0034	-119,995	20,0069	120,01
5	19,99162	-0,012	20,0039	-119,995	20,0077	120,011
6	19,98896	-0,016	20,006	-119,992	20,0112	120,016
7	19,98823	-0,017	20,0067	-119,991	20,0122	120,017
8	19,98559	-0,02	20,0098	-119,986	20,0171	120,024
9	19,98547	-0,02	20,0098	-119,986	20,0171	120,024
10	19,98414	-0,022	20,0132	-119,982	20,022	120,031
11	19,98347	-0,023	20,0128	-119,982	20,0219	120,031
12	19,98294	-0,024	20,024	-119,966	20,036	120,05
13	19,98346	-0,023	20,0293	-119,959	20,0423	120,059
14	19,98366	-0,023	20,0301	-119,958	20,0431	120,06
15	19,98571	-0,02	20,0355	-119,95	20,0492	120,069
16	19,98607	-0,02	20,0363	-119,949	20,0501	120,07
17	19,98693	-0,018	20,0378	-119,947	20,0517	120,072
18	19,98657	-0,019	20,0377	-119,947	20,0517	120,072
19	19,9868	-0,019	20,0377	-119,947	20,0517	120,072
20	19,98672	-0,019	20,0377	-119,947	20,0517	120,072

**Tabel 4.2** Hasil Arus Fasa pada MATLAB

Arus (A)						
Bus	Fasa R	Sudut	Fasa S	Sudut	Fasa T	Sudut
1	101,8795	0,017837	36,14883	59,8985	80,46586	299,9187
2	101,8795	0,017837	36,14883	59,8985	80,46586	299,9187
3	92,87891	0,019379	39,94873	59,90809	81,16582	299,9194
4	78,52464	0,02139	43,99823	59,91623	82,46549	299,9206
5	72,12219	0,022333	48,99737	59,92429	84,31485	299,9221
6	66,21972	0,023272	51,3969	59,92757	85,06456	299,9227
7	57,3148	0,024473	53,84617	59,93048	86,01403	299,9234
8	47,19385	0,026167	55,89549	59,93269	86,96345	299,924
9	9,506909	0,020466	1,999024	-120,014	0,749359	119,9761
10	26,5289	0,030683	62,69216	59,9385	89,56122	299,9255
11	9,457818	0,023283	5,246633	-120,018	1,847979	119,9694
12	8,013901	0,04886	71,83622	59,94401	93,25717	299,9273
13	7,799587	179,9985	80,6756	59,94647	94,25537	299,9275
14	24,21316	-179,985	84,86945	59,94708	95,852	299,9277
15	31,86942	-179,983	84,9693	59,9471	95,852	299,9277
16	41,12603	-179,982	86,16717	59,94714	96,45052	299,9277
17	50,48255	-179,982	87,16536	59,94717	96,45052	299,9277
18	13,80928	0,01892	3,74295	-120,053	0,349097	119,9278
19	21,86447	0,018637	4,860828	-120,053	1,795357	119,9278
20	9,256146	0,018704	1,018079	-120,053	0,698195	119,9278

Selain hasil data MATLAB diperoleh, hasil tegangan dan arus dari ETAP juga diperoleh untuk dijadikan perbandingan pada analisa daya.

**Tabel 4.3** Hasil Tegangan Line-Line pada ETAP

Tegangan (Line-Line) (Kv)						
Bus	Fasa R-S	Sudut	Fasa S-T	Sudut	Fasa T-R	Sudut
1	20	30	20	-90	20	150
2	20	30	20	-89	20	150
3	19,99	29,99	20	-89,97	20	149,98
4	19,98	29,99	19,99	-89,97	20	149,98
5	19,98	29,98	19,99	-89,95	20	149,97
6	19,97	29,98	19,99	-89,95	20	149,96
7	19,97	29,98	19,99	-89,94	20,01	149,96
8	19,96	29,97	19,99	-89,92	20,01	149,94

**Tabel 4.3** Hasil Tegangan Line-Line pada ETAP(lanjutan)

Tegangan (Line-Line) (Kv)						
Bus	Fasa R-S	Sudut	Fasa S-T	Sudut	Fasa T-R	Sudut
9	19,96	29,97	19,99	-89,92	20,01	149,94
10	19,95	29,97	19,99	-89,91	20,01	149,93
11	19,95	29,97	19,99	-89,91	20,01	149,93
12	19,95	29,96	20	-89,87	20,02	149,91
13	19,95	29,96	20	-89,86	20,03	149,9
14	19,95	29,96	20,01	-89,86	20,03	149,9
15	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89
16	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89
17	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89
18	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89
19	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89
20	19,95	29,96	20,01	-89,85	20,04	149,89

**Tabel 4.4** Hasil Arus Fasa pada ETAP

Arus (A)						
Bus	Fasa R	Sudut	Fasa S	Sudut	Fasa T	Sudut
1	102,7	24,57	118,05	-168,09	29	140,92
2	96,7	26,47	110,1	-168,44	30	135,33
3	85,4	29,1	97,5	-170,31	33,1	130,62
4	80,5	30,7	90,2	-172,68	36	124
5	75,2	31,68	83,9	-174,68	37,3	121,75
6	68,2	33,93	75,7	-177,02	39	119,09
7	59,8	36,47	66,5	-179,66	40,4	117,09
8	45,4	47,05	49,4	-169,21	45,9	112,45
9	7,8	9,85	8,7	-158,71	1,9	77,32
10	7,3	-10,98	8,3	-164,67	3,7	76,72
11	8	6,67	10,8	-149,29	4,8	73,8
12	37,2	64,92	35,5	-151,39	52,9	106,87
13	35,6	83,03	26,5	-52,66	57,6	101,77
14	35,9	-76,14	25,6	-84,51	61,4	100,37
15	36,7	-66,7	26,8	-97,58	61,3	100,28
16	39,3	-56,31	31	-110,74	62,6	99,93
17	43,3	-48,41	35,1	-121,2	63,3	99,57
18	10	-25,38	11	168,62	2,7	50,37
19	11,2	17,64	13,6	-152,39	3,2	64,98
20	6,8	-13,39	6,8	176,78	1,2	82,45

## 4.2. Hasil Analisis *Voltage Unbalance*

Setelah melakukan analisis aliran daya, akan dilakukan analisis *voltage unbalance* yang disebabkan oleh beban yang tidak seimbang. Untuk menganalisa *voltage unbalance*, perlu ditinjau kembali hasil tegangan dari simulasi MATLAB dengan ETAP pada tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Data Error Magnitudo Tegangan Fasa R-S

Tegangan (Line-Line) (Kv)			
Bus	Fasa R-S		% Error
	MATLAB	ETAP	
1	20	20	0
2	19,9986	20	0,00682
3	19,994	19,99	0,0203
4	19,9923	19,98	0,0618
5	19,9916	19,98	0,0581
6	19,989	19,97	0,0949
7	19,9882	19,97	0,0913
8	19,9856	19,96	0,1282
9	19,9855	19,96	0,1276
10	19,9841	19,95	0,1712
11	19,9835	19,95	0,1678
12	19,9829	19,95	0,1651
13	19,9835	19,95	0,1677
14	19,9837	19,95	0,1687
15	19,9857	19,95	0,179
16	19,9861	19,95	0,1808
17	19,9869	19,95	0,1851
18	19,9866	19,95	0,1833
19	19,9868	19,95	0,1845
20	19,9867	19,95	0,1841

**Tabel 4.6** Data Error Magnitudo Tegangan Fasa S-T

Tegangan (Line-Line) (Kv)			
Bus	Fasa S-T		% Error
	MATLAB	ETAP	
1	20	20	0
2	20,0005	20	0,0024
3	20,0025	20	0,0123
4	20,0034	19,99	0,0671

**Tabel 4.6** Data Error Magnitudo Tegangan Fasa S-T(lanjutan)

Tegangan (Line-Line) (Kv)			
Bus	Fasa S-T		% Error
	MATLAB	ETAP	
5	20,0039	19,99	0,0696
6	20,006	19,99	0,0799
7	20,0067	19,99	0,0834
8	20,0098	19,99	0,099
9	20,0098	19,99	0,0989
10	20,0132	19,99	0,1161
11	20,0128	19,99	0,1142
12	20,024	20	0,12
13	20,0293	20	0,1467
14	20,0301	20,01	0,1002
15	20,0355	20,01	0,1275
16	20,0363	20,01	0,1313
17	20,0378	20,01	0,1388
18	20,0377	20,01	0,1383
19	20,0377	20,01	0,1386
20	20,0377	20,01	0,1386

**Tabel 4.7** Data Error Magnitudo Tegangan Fasa T-R

Tegangan (Line-Line) (Kv)			
Bus	Fasa T-R		% Error
	MATLAB	ETAP	
1	20	20	0
2	20,00108	20	0,00539
3	20,00509	20	0,02545
4	20,00688	20	0,0344
5	20,00773	20	0,03867
6	20,01115	20	0,05577
7	20,01225	20,01	0,01124
8	20,01711	20,01	0,03556
9	20,0171	20,01	0,03551
10	20,02201	20,01	0,06
11	20,02187	20,01	0,05933
12	20,03603	20,02	0,08005
13	20,04226	20,03	0,06121

**Tabel 4.7** Data Error Magnitudo Tegangan Fasa T-R(lanjutan)

Tegangan (Line-Line) (Kv)			
Bus	Fasa T-R		% Error
	MATLAB	ETAP	
14	20,04306	20,03	0,0652
15	20,04923	20,04	0,04604
16	20,05008	20,04	0,0503
17	20,05173	20,04	0,05854
18	20,05172	20,04	0,05849
19	20,05172	20,04	0,05849
20	20,05171	20,04	0,05845

Untuk mendapatkan hasil *voltage unbalance*, dapat menggunakan persamaan (2.15). Hasil *voltage unbalance* ini akan dibandingkan dengan kondisi saat sistem distribusi tegalsari terhubung DG dengan tidak terhubung DG. Hasil tegangan yang digunakan berasal dari hasil simulasi MATLAB

**Tabel 4.8** Hasil Voltage Unbalance Saat Terhubung DG

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
1	20	0
	20	
	20	
2	19,99863503	0,007156215
	20,00048482	
	20,001079	
3	19,99404964	0,032415228
	20,00245906	
	20,00508987	
4	19,99234768	0,042660399
	20,00341366	
	20,00687906	
5	19,99161729	0,047346722
	20,00391035	
	20,00773381	
6	19,98895808	0,065349497
	20,00597636	
	20,01115349	

**Tabel 4.8** Hasil Voltage Unbalance Saat Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
7	19,98822929	0,070744259
	20,00666174	
	20,01224845	
8	19,98559169	0,092847582
	20,00978896	
	20,01711458	
9	19,98546577	0,093206791
	20,00976246	
	20,01710465	
10	19,98414492	0,111509259
	20,01321171	
	20,02200529	
11	19,98346688	0,11292284
	20,0128353	
	20,02187268	
12	19,9829419	0,156809279
	20,02400978	
	20,03602698	
13	19,98345704	0,174322536
	20,02934334	
	20,04226024	
14	19,98365867	0,176155206
	20,03005088	
	20,04305959	
15	19,98570592	0,188661799
	20,03551561	
	20,04922622	
16	19,98606977	0,190137407
	20,03627886	
	20,05008084	
17	19,98693224	0,19248239
	20,03776984	
	20,05173119	

**Tabel 4.8** Hasil Voltage Unbalance Saat Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
18	19,98656641	0,193521123
	20,03767056	
	20,05172193	
19	19,98680219	0,192849902
	20,03774089	
	20,0517205	
20	19,98671956	0,193099765
	20,03773179	
	20,05171425	

**Tabel 4.9** Hasil Voltage Unbalance Saat Tidak Terhubung DG

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
1	20	0
	20	
	20	
2	19,99729082	0,007176216
	19,99914575	
	19,99974135	
3	19,98775246	0,032514915
	19,9961855	
	19,99882276	
4	19,98387623	0,042797602
	19,99497366	
	19,99844765	
5	19,98212999	0,047501961
	19,99445809	
	19,99829112	
6	19,97544278	0,065579301
	19,99251008	
	19,99770054	
7	19,97343864	0,070998494
	19,99192441	
	19,99752562	
8	19,965196	0,09321324
	19,98946483	
	19,99680988	



**Tabel 4.9** Hasil Voltage Unbalance Saat Tidak Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
9	19,96507001	0,093573003
	19,98943833	
	19,99679994	
10	19,95828075	0,111987626
	19,98743581	
	19,99625329	
11	19,95760226	0,113403977
	19,98705915	
	19,99612059	
12	19,94202661	0,157622578
	19,98322473	
	19,99527678	
13	19,93592454	0,175291462
	19,98195771	
	19,99491339	
14	19,93529196	0,177143012
	19,98183295	
	19,9948809	
15	19,93090454	0,189792837
	19,98087691	
	19,99463025	
16	19,93038232	0,191287619
	19,98075587	
	19,99460104	
17	19,92953397	0,193667751
	19,98053923	
	19,99454464	
18	19,9291676	0,194711004
	19,9804398	
	19,99453536	
19	19,92940373	0,194036862
	19,98051024	
	19,99453393	

**Tabel 4.9** Hasil Voltage Unbalance Saat Tidak Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Voltage (line-line) (Kv)	% Voltage Unbalance
20	19,92932097	0,194287813
	19,98050112	
	19,99452768	

### 4.3. Hasil Analisis Hubung Singkat

#### 4.3.1. Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Dalam analisis hubung singkat, hasil dari simulasi MATLAB akan di bandingkan dengan simulasi ETAP. Pada simulasi ETAP, hasil hubung singkat satu fasa ke tanah pada fasa R sama dengan fasa S dan fasa T. Untuk simulasi MATLAB, hubung singkat yang akan diuji adalah fasa R. Sistem akan di simulasikan dalam kondisi terhubung DG dan tanpa terhubung DG.

**Tabel 4.10** Hasil Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	Matlab (KA)	ETAP (KA)	% Error
	Fasa R	Fasa R	
1	3,34986	3,405	1,61938326
2	3,34418	3,4	1,64176471
3	3,32317	3,38	1,68136095
4	3,31393	3,371	1,69296945
5	3,3096	3,367	1,7047817
6	3,29244	3,35	1,71820896
7	3,28699	3,334	1,410018
8	3,26305	3,31	1,418429
9	3,25737	3,302	1,35160509
10	3,23967	3,288	1,46989051
11	3,20893	3,245	1,11155624
12	3,17533	3,225	1,54015504
13	3,14713	3,197	1,55989991
14	3,14357	3,193	1,54807391
15	3,11626	3,166	1,57106759
16	3,1125	3,163	1,59658552
17	3,10526	3,155	1,57654517
18	3,09405	3,14	1,4633758

**Tabel 4.10** Hasil Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	Matlab (KA)	ETAP (KA)	% Error
	Fasa R	Fasa R	
19	3,10274	3,152	1,56281726
20	3,09897	3,147	1,52621544

**Tabel 4.11** Hasil Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	Matlab (KA)	ETAP (KA)	% Error
	Fasa R	Fasa R	
1	2,88674	2,887	0,00900589
2	2,88106	2,881	0,0020826
3	2,86005	2,86	0,0017483
4	2,85081	2,851	0,00666433
5	2,84649	2,846	0,0172171
6	2,82932	2,829	0,0113114
7	2,82388	2,812	0,4224751
8	2,79994	2,788	0,428264
9	2,79426	2,782	0,4406902
10	2,77655	2,765	0,4177215
11	2,74581	2,734	0,4319678
12	2,71221	2,7	0,4522222
13	2,68401	2,672	0,449476
14	2,68046	2,669	0,4293743
15	2,65314	2,642	0,4216503
16	2,64939	2,638	0,4317665
17	2,64215	2,631	0,4237932
18	2,63094	2,619	0,4558992
19	2,63963	2,628	0,4425419
20	2,63585	2,624	0,4516006

#### 4.3.2. Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Pada simulasi ini, dilakukan hubung singkat dua fasa ketanah. Sama seperti kasus hubung singkat satu fasa ketanah, hasil hubung singkat tiap fasa yang akan diuji akan bernilai sama. Pada simulasi ini, hubung singkat dua fasa ketanah menggunakan fasa S dan fasa T.

**Tabel 4.12** Hasil Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	3,37602	3,37608	3,33	3,296	1,382	2,430
2	3,37034	3,3704	3,324	3,291	1,394	2,413
3	3,34933	3,34939	3,301	3,273	1,464	2,334
4	3,34009	3,34015	3,291	3,265	1,492	2,302
5	3,33576	3,33583	3,287	3,261	1,483	2,295
6	3,3186	3,31866	3,268	3,246	1,548	2,238
7	3,31316	3,31322	3,25	3,231	1,943	2,545
8	3,28921	3,28927	3,224	3,209	2,023	2,501
9	3,28353	3,2836	3,217	3,201	2,068	2,580
10	3,26583	3,26589	3,199	3,189	2,089	2,411
11	3,23509	3,23515	3,161	3,145	2,344	2,866
12	3,20149	3,20155	3,129	3,131	2,317	2,253
13	3,17329	3,17335	3,098	3,105	2,430	2,201
14	3,16974	3,1698	3,094	3,102	2,448	2,186
15	3,14242	3,14248	3,065	3,078	2,526	2,095
16	3,13867	3,13873	3,06	3,074	2,571	2,106
17	3,13143	3,13149	3,053	3,068	2,569	2,069
18	3,12022	3,12028	3,039	3,052	2,673	2,237
19	3,12891	3,12897	3,05	3,064	2,587	2,120
20	3,12513	3,12519	3,045	3,059	2,632	2,164

**Tabel 4.13** Hasil Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	FasaT	Fasa S	Fasa T
1	2,88664	2,8867	2,887	2,887	0,01247	0,0103914
2	2,88096	2,88102	2,881	2,881	0,001388	0,000694
3	2,85995	2,86001	2,86	2,86	0,001748	0,00035
4	2,85071	2,85077	2,851	2,851	0,010172	0,0080673
5	2,84638	2,84645	2,846	2,846	0,013352	0,015812

**Tabel 4.13** Hasil Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	FasaT	Fasa S	Fasa T
6	2,82922	2,82928	2,829	2,829	0,007777	0,009897
7	2,82378	2,82384	2,812	2,812	0,418919	0,421053
8	2,79983	2,79989	2,788	2,788	0,424319	0,426471
9	2,79415	2,79422	2,782	2,782	0,436736	0,439252
10	2,77645	2,77651	2,765	2,765	0,414105	0,416275
11	2,74571	2,74577	2,734	2,734	0,42831	0,430505
12	2,71211	2,71217	2,7	2,7	0,448519	0,450741
13	2,68391	2,68397	2,672	2,672	0,445734	0,447979
14	2,68036	2,68042	2,669	2,669	0,425628	0,427876
15	2,65304	2,6531	2,642	2,642	0,417865	0,420136
16	2,64929	2,64935	2,638	2,638	0,427976	0,43025
17	2,64205	2,64211	2,631	2,631	0,419992	0,422273
18	2,63084	2,6309	2,619	2,619	0,452081	0,454372
19	2,63959	2,63959	2,628	2,628	0,44102	0,44102
20	2,63575	2,63581	2,624	2,624	0,44779	0,450076

#### 4.3.3. Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Pada simulasi ini juga akan dilakukan hubung singkat tiga fasa ketanah.

**Tabel 4.14** Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			%Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1	3,24424	3,24424	3,24424	3,207	3,207	3,207	1,1612
2	3,25855	3,25855	3,25855	3,201	3,201	3,201	1,7979
3	3,21754	3,21754	3,21754	3,18	3,18	3,18	1,1805
4	3,2083	3,2083	3,2083	3,171	3,171	3,171	1,1763
5	3,20398	3,20398	3,20398	3,167	3,167	3,167	1,1677
6	3,18681	3,18681	3,18681	3,149	3,149	3,149	1,2007
7	3,18137	3,18137	3,18137	3,132	3,132	3,132	1,5763

**Tabel 4.14** Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			%Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
8	3,15743	3,15743	3,15743	3,108	3,108	3,108	1,5904
9	3,15175	3,15175	3,15175	3,101	3,101	3,101	1,6366
10	3,13404	3,13404	3,13404	3,085	3,085	3,085	1,5896
11	3,1033	3,1033	3,1033	3,047	3,047	3,047	1,8477
12	3,0697	3,0697	3,0697	3,02	3,02	3,02	1,6457
13	3,0415	3,0415	3,0415	2,991	2,991	2,991	1,6884
14	3,03795	3,03795	3,03795	2,988	2,988	2,988	1,6717
15	3,01063	3,01063	3,01063	2,96	2,96	2,96	1,7105
16	3,00688	3,00688	3,00688	2,956	2,956	2,956	1,7212
17	2,99964	2,99964	2,99964	2,949	2,949	2,949	1,7172
18	2,98843	2,98843	2,98843	2,935	2,935	2,935	1,8204
19	2,99712	2,99712	2,99712	2,946	2,946	2,946	1,7352
20	2,99334	2,99334	2,99334	2,941	2,941	2,941	1,7797

**Tabel 4.15** Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			%Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1	2,88674	2,88674	2,88674	2,887	2,887	2,887	0,00901
2	2,88106	2,88106	2,88106	2,881	2,881	2,881	0,0021
3	2,86005	2,86005	2,86005	2,86	2,86	2,86	0,0017
4	2,85081	2,85081	2,85081	2,851	2,851	2,851	0,00666
5	2,84649	2,84649	2,84649	2,846	2,846	2,846	0,0172
6	2,82932	2,82932	2,82932	2,829	2,829	2,829	0,0113
7	2,82388	2,82388	2,82388	2,812	2,812	2,812	0,4225
8	2,79994	2,79994	2,79994	2,788	2,788	2,788	0,4283
9	2,79426	2,79426	2,79426	2,782	2,782	2,782	0,4407
10	2,77655	2,77655	2,77655	2,765	2,765	2,765	0,4177
11	2,74581	2,74581	2,74581	2,734	2,734	2,734	0,432
12	2,71221	2,71221	2,71221	2,7	2,7	2,7	0,4522

**Tabel 4.15** Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah pada Sistem tanpa Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			%Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
13	2,68401	2,68401	2,68401	2,672	2,672	2,672	0,4495
14	2,68046	2,68046	2,68046	2,669	2,669	2,669	0,4294
15	2,65314	2,65314	2,65314	2,642	2,642	2,642	0,4217
16	2,64939	2,64939	2,64939	2,638	2,638	2,638	0,4318
17	2,64215	2,64215	2,64215	2,631	2,631	2,631	0,4238
18	2,63094	2,63094	2,63094	2,619	2,619	2,619	0,4559
19	2,63963	2,63963	2,63963	2,628	2,628	2,628	0,4425
20	2,63585	2,63585	2,63585	2,624	2,624	2,624	0,4516

#### 4.3.4. Hubung Singkat Fasa dengan Fasa

Pada simulasi ini, dilakukan hubung singkat fasa dengan fasa. Sama seperti kasus hubung singkat satu fasa ketanah dan dua fasa ke tanah, hasil hubung singkat tiap fasa-fasa yang akan diuji akan bernilai sama. Pada simulasi ini, hubung singkat fasa dengan fasa menggunakan fasa S dan fasa T.

**Tabel 4.16** Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem Terhubung DG

Hubung Singkat Fasa-Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	2,81788	2,85741	2,799	2,799	0,6745	2,0868
2	2,81296	2,85249	2,794	2,794	0,6786	2,0934
3	2,79477	2,8343	2,776	2,776	0,6762	2,1001
4	2,78677	2,8263	2,768	2,768	0,6781	2,1062
5	2,78302	2,82255	2,764	2,764	0,6881	2,1183
6	2,76816	2,80768	2,75	2,75	0,6604	2,0975
7	2,76344	2,80297	2,735	2,735	1,0399	2,4852
8	2,74271	2,78224	2,714	2,714	1,0578	2,5144
9	2,73779	2,77732	2,708	2,708	1,1001	2,5598
10	2,72246	2,76199	2,694	2,694	1,0564	2,5238
11	2,69584	2,73537	2,661	2,661	1,3093	2,7948

**Tabel 4.16** Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Fasa-Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
12	2,66674	2,70627	2,638	2,638	1,0895	2,5879
13	2,64232	2,6815	2,614	2,614	1,0834	2,5822
14	2,63924	2,67877	2,611	2,611	1,0816	2,5956
15	2,61558	2,65511	2,587	2,587	1,1048	2,6328
16	2,61233	2,65186	2,583	2,583	1,1355	2,6659
17	2,60607	2,64559	2,577	2,577	1,1281	2,6616
18	2,59636	2,63588	2,565	2,565	1,2226	2,7634
19	2,60388	2,64341	2,574	2,574	1,1608	2,6966
20	2,60061	2,64014	2,57	2,57	1,1911	2,7292

**Tabel 4.17** Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem tanpa Terhubung DG

Hubung Singkat Fasa-Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	2,49992	2,49992	2,5	2,5	0,0032	0,0032
2	2,495	2,495	2,495	2,495	0	0
3	2,47681	2,47681	2,477	2,477	0,007671	0,007671
4	2,4688	2,4688	2,469	2,469	0,0081	0,0081
5	2,46506	2,46506	2,465	2,465	0,00243	0,00243
6	2,45019	2,45019	2,45	2,45	0,00776	0,00776
7	2,44548	2,44548	2,435	2,435	0,43039	0,43039
8	2,42474	2,42474	2,415	2,415	0,40331	0,40331
9	2,41983	2,41983	2,41	2,41	0,40788	0,40788
10	2,40449	2,40449	2,394	2,394	0,43818	0,43818
11	2,37787	2,37787	2,368	2,368	0,41681	0,41681
12	2,34878	2,34878	2,339	2,339	0,41813	0,41813
13	2,32435	2,32435	2,314	2,314	0,44728	0,44728
14	2,32128	2,32128	2,311	2,311	0,44483	0,44483
15	2,29762	2,29762	2,288	2,288	0,42045	0,42045
16	2,29437	2,29437	2,284	2,284	0,45403	0,45403
17	2,2881	2,2881	2,278	2,278	0,44337	0,44337



**Tabel 4.17** Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa pada Sistem tanpa Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Fasa-Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error Fasa S	%Error Fasa T
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T		
18	2,27839	2,27839	2,268	2,268	0,45811	0,45811
19	2,28592	2,28592	2,276	2,276	0,43585	0,43585
20	2,28265	2,28265	2,273	2,273	0,42455	0,42455

#### 4.3.5 Pembahasan Hasil Analisis Hubung Singkat

Hasil simulasi dari seluruh hubung singkat pada MATLAB menunjukkan bahwa saat kondisi sistem distribusi tidak seimbang terhubung DG, terdapat error dari rentang 1% - 2,8%. Error ini didapat dari hasil perbandingan ETAP. Sedangkan simulasi dari hubung singkat pada sistem distribusi tidak seimbang tidak terhubung dengan DG memiliki error dibawah 1%. Hal ini dapat terjadi dikarenakan besar impedansi pada DG tidak sepenuhnya benar saat perhitungan algoritma pada MATLAB. Besar impedansi pada DG yang didapat sebelumnya dari ETAP masih bernilai persen, sehingga mempengaruhi nilai hubung singkat pada sistem.

Besar nilai hubung singkat dapat diperoleh dari arus kontribusi grid, *distributed generation*, (DG), dan saluran karena memiliki nilai impedansi.

Untuk kondisi beban yang dianggap 100% statis dan tidak seimbang tiap fasanya tidak memiliki arus kontribusi hubung singkat pada bus yang terjadi gangguan. Hal ini terjadi karena beban dengan 100% statis tidak memiliki nilai impedansi.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan percobaan simulasi yang telah dilakukan pada pelaksanaan tugas akhir ini didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pada saat melakukan simulasi aliran daya pada sistem jaringan distribusi tidak seimbang menggunakan metode *backward-forward*, hasil tegangan pada MATLAB yang dikalibrasi dengan ETAP sudah mendekati dan memiliki error yang sangat kecil.
- b. Untuk besar arus yang didapat pada simulasi aliran daya menggunakan MATLAB tidak sesuai dengan ETAP untuk sistem jaringan distribusi tidak seimbang. Pada saat percobaan dengan sistem distribusi seimbang, besar nilai arus yang dihasilkan pada simulasi MATLAB sudah mendekati dengan hasil ETAP.
- c. Beban yang memiliki kondisi tidak seimbang dapat menyebabkan tegangan pada sistem kelistrikan tidak seimbang di setiap salurannya.
- d. Dalam simulasi hubung singkat, arus kontribusi berasal dari grid, *distributed generation* (DG), dan saluran karena besar hubung singkat dipengaruhi oleh nilai impedansi.
- e. Dalam sistem tenaga, kondisi beban yang tidak seimbang pada tiap fasanya dan beban yang dianggap 100% statis tidak memiliki kontribusi arus hubung singkat.

#### **5.2. Saran**

Saran yang dapat diberikan dari hasil analisis untuk pengembangan dan perbaikan simulasi ini adalah:

- a. Untuk metode *backward-forward* yang dilakukan pada program MATLAB dapat dilakukan pengembangan terhadap sistem radial yang tidak seimbang dikarenakan data arus yang diperoleh dari simulasi MATLAB tidak sesuai dengan simulasi ETAP.
- b. Diperlukan perbaikan algoritma hubung singkat pada MATLAB dikarenakan pada saat simulasi hubung singkat, diperoleh error yang lebih besar pada saat sistem distribusi terhubung DG dibandingkan error pada sistem distribusi tidak terhubung DG.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. P. Erwin Prawira Santosa, Ni Ketut Aryani, "Optimasi Penentuan Lokasi Kapasitor dan Distributed Generation (DG) Dengan Rekonfigurasi Jaringan Untuk Meningkatkan Keluaran Daya Aktif DG Pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Genetic Algorithm (GA)," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. Vol. 5, p. No. 2, 2016.
- [2] Umar, Firdaus, M. Ashari, and O. Penangsang, "Optimal Location, Size and Type of DGs To Reduce Power Losses and Voltage Deviation Considering THD in Radial Unbalance Distribution System," *IEEE*, 2016.
- [3] O. P. Rizky Pratama Putra, Adi Soeprijanto, "Analisa Penempatan Distributed Generation pada Jaringan Distribusi 20kV," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. Vol. 1, p. No. 1, Sept. 2012 2012.
- [4] C. S. Mishra, D. R. K. Jena, and G. S. Mishra, "Study on Fault od Grid Tied DG A-Novel Method for Improvement of Power Quality Under Unbalanced Voltage Condition," Jan, 06-07, 2017 2017.
- [5] J. Schlabbach, *Short-Circuit Current*, 2005.
- [6] A. G. Bhutad, S. V. kulkarni, and S. A. Khaparde, "Three-Phase Load Flow Method for Radial Distribution Networks," 2003.
- [7] R. Priddle, *Distributed Generation In Liberalised Electricity Markets*. France: International Energy Agency, 2002.
- [8] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, 2008.
- [9] H. Saadat, *Power System Analysis*, 1999.
- [10] P. Samal and S. Ganguly, "A Modified Forward Backward Sweep Load Flow Algoritihm for Unbalance Radial Distribution System," 5 October 2015 2015.

.....*Halaman ini sengaja dikosongkan*.....

## LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Beban Seimbang 3 Fasa

Daya Beban Seimbang 3 fasa						
Bus	Fasa R		Fasa S		Fasa T	
	P (MW)	Q (MW)	P (MW)	Q (MW)	P (MW)	Q (MW)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,057	0,033	0,057	0,033	0,057	0,033
3	0,102	0,0293	0,102	0,0293	0,102	0,0293
4	0,0633	0,025	0,0633	0,025	0,0633	0,025
5	0,0487	0,0117	0,0487	0,0117	0,0487	0,0117
6	0,0637	0,0183	0,0637	0,0183	0,0637	0,0183
7	0,0697	0,0178	0,0697	0,0178	0,0697	0,0178
8	0,0897	0,029	0,0897	0,029	0,0897	0,029
9	0,061	0,0207	0,061	0,0207	0,061	0,0207
10	0,061	0,0377	0,061	0,0377	0,061	0,0377
11	0,08	0,0303	0,08	0,0303	0,08	0,0303
12	0,099	0,072	0,099	0,072	0,099	0,072
13	0,103	0,045	0,103	0,045	0,103	0,045
14	0,0377	0,014	0,0377	0,014	0,0377	0,014
15	0,0547	0,019	0,0547	0,019	0,0547	0,019
16	0,046	0,023	0,046	0,023	0,046	0,023
17	0,0967	0,0307	0,0967	0,0307	0,0967	0,0307
18	0,0523	0,067	0,0523	0,067	0,0523	0,067
19	0,0923	0,0247	0,0923	0,0247	0,0923	0,0247
20	0,0408	0,0323	0,0408	0,0323	0,0408	0,0323

Lampiran 2. Hasil Loadflow Balance Terhubung DG

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
1	Fasa R	20	0	4,98661	179,6118
	Fasa S	20	-120	4,98661	59,61178
	Fasa T	20	120	4,98661	299,6118

Lampiran 2. Hasil Loadflow Balance Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
2	Fasa R	20,00007	0	4,98661	179,6118
	Fasa S	20,00007	-120	4,98661	59,61178
	Fasa T	20,00007	120,0001	4,98661	299,6118
3	Fasa R	20,00054	0,000759	9,48654	179,7959
	Fasa S	20,00054	-119,999	9,48654	59,79589
	Fasa T	20,00054	120,0008	9,48654	299,7959
4	Fasa R	20,00089	0,001249	16,0528	179,8791
	Fasa S	20,00089	-119,999	16,0528	59,87907
	Fasa T	20,00089	120,0012	16,0528	299,8791
5	Fasa R	20,0011	0,001542	20,4691	179,9049
	Fasa S	20,0011	-119,998	20,4691	59,90489
	Fasa T	20,0011	120,0015	20,4691	299,9049
6	Fasa R	20,00204	0,002872	23,486	179,9169
	Fasa S	20,00204	-119,997	23,486	59,91691
	Fasa T	20,00204	120,0029	23,486	299,9169
7	Fasa R	20,0024	0,003366	27,5855	179,9288
	Fasa S	20,0024	-119,997	27,5855	59,92883
	Fasa T	20,0024	120,0034	27,5855	299,9288
8	Fasa R	20,00419	0,005882	31,957	179,9381
	Fasa S	20,00419	-119,994	31,957	59,93811
	Fasa T	20,00419	120,0059	31,957	299,9381
9	Fasa R	20,00413	0,005806	4,08266	-0,00581
	Fasa S	20,00413	-119,994	4,08266	-120,006
	Fasa T	20,00413	120,0058	4,08266	119,9942
10	Fasa R	20,00648	0,009103	41,9719	179,9515
	Fasa S	20,00648	-119,991	41,9719	59,95148
	Fasa T	20,00648	120,0091	41,9719	299,9515
11	Fasa R	20,00608	0,008548	5,51332	-0,00855
	Fasa S	20,00608	-119,991	5,51332	-120,009
	Fasa T	20,00608	120,0085	5,51332	119,9915
12	Fasa R	20,01437	0,020173	52,4172	179,9594
	Fasa S	20,01437	-119,98	52,4172	59,95939
	Fasa T	20,01437	120,0202	52,4172	299,9594



Lampiran 2. Hasil Loadflow Balance Terhubung DG(lanjutan)

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
13	Fasa R	20,0184	0,025832	60,961	179,9623
	Fasa S	20,0184	-119,974	60,961	59,96226
	Fasa T	20,0184	120,0258	60,961	299,9623
14	Fasa R	20,01897	0,026632	68,3542	179,9635
	Fasa S	20,01897	-119,973	68,3542	59,96354
	Fasa T	20,01897	120,0266	68,3542	299,9635
15	Fasa R	20,02353	0,033032	70,9353	179,9639
	Fasa S	20,02353	-119,967	70,9353	59,9639
	Fasa T	20,02353	120,033	70,9353	299,9639
16	Fasa R	20,0242	0,033959	74,6144	179,9641
	Fasa S	20,0242	-119,966	74,6144	59,96405
	Fasa T	20,0242	120,034	74,6144	299,9641
17	Fasa R	20,02553	0,035831	78,0603	179,9641
	Fasa S	20,02553	-119,964	78,0603	59,96414
	Fasa T	20,02553	120,0358	78,0603	299,9641
18	Fasa R	20,02537	0,035609	5,95894	-0,03561
	Fasa S	20,02537	-119,964	5,95894	-120,036
	Fasa T	20,02537	120,0356	5,95894	119,9644
19	Fasa R	20,02548	0,035751	9,49441	-0,03573
	Fasa S	20,02548	-119,964	9,49441	-120,036
	Fasa T	20,02548	120,0358	9,49441	119,9643
20	Fasa R	20,02544	0,035706	3,65185	-0,03571
	Fasa S	20,02544	-119,964	3,65185	-120,036
	Fasa T	20,02544	120,0357	3,65185	119,9643

Lampiran 3. Hasil Loadflow Balance Tanpa DG

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
1	Fasa R	20	0	95,0449	0,02978
	Fasa S	20	-120	95,0449	-119,97
	Fasa T	20	120	95,0449	120,03
2	Fasa R	19,999	-0,0018	95,0449	0,02978
	Fasa S	19,999	-120	95,0449	-119,97
	Fasa T	19,999	120	95,0449	120,03

Lampiran 3. Hasil Loadflow Balance Tanpa DG(lanjutan)

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
3	Fasa R	19,994	-0,0081	90,5446	0,03117
	Fasa S	19,994	-120,01	90,5446	-119,97
	Fasa T	19,994	119,99	90,5446	120,031
4	Fasa R	19,992	-0,0106	83,9762	0,03298
	Fasa S	19,992	-120,01	83,9762	-119,97
	Fasa T	19,992	119,99	83,9762	120,033
5	Fasa R	19,992	-0,0118	79,558	0,03422
	Fasa S	19,992	-120,01	79,558	-119,97
	Fasa T	19,992	119,99	79,558	120,034
6	Fasa R	19,989	-0,0161	76,5398	0,0351
	Fasa S	19,989	-120,02	76,5398	-119,96
	Fasa T	19,989	119,98	76,5398	120,035
7	Fasa R	19,988	-0,0174	72,4374	0,03618
	Fasa S	19,988	-120,02	72,4374	-119,96
	Fasa T	19,988	119,98	72,4374	120,036
8	Fasa R	19,984	-0,0228	68,0627	0,03738
	Fasa S	19,984	-120,02	68,0627	-119,96
	Fasa T	19,984	119,98	68,0627	120,037
9	Fasa R	19,984	-0,0229	4,08681	0,02285
	Fasa S	19,984	-120,02	4,08681	-119,98
	Fasa T	19,984	119,98	4,08681	120,023
10	Fasa R	19,981	-0,0272	58,0376	0,0399
	Fasa S	19,981	-120,03	58,0376	-119,96
	Fasa T	19,981	119,97	58,0376	120,04
11	Fasa R	19,98	-0,0278	5,52045	0,0278
	Fasa S	19,98	-120,03	5,52045	-119,97
	Fasa T	19,98	119,97	5,52045	120,028
12	Fasa R	19,974	-0,0373	47,5789	0,04262
	Fasa S	19,974	-120,04	47,5789	-119,96
	Fasa T	19,974	119,96	47,5789	120,043
13	Fasa R	19,971	-0,041	39,0176	0,04378
	Fasa S	19,971	-120,04	39,0176	-119,96
	Fasa T	19,971	119,96	39,0176	120,044

Lampiran 3. Hasil Loadflow Balance Tanpa DG(lanjutan)

Bus	Fasa	Tegangan		Arus	
		Magnitude	Sudut	Magnitude	Sudut
14	Fasa R	19,971	-0,0413	31,6068	0,04444
	Fasa S	19,971	-120,04	31,6068	-119,96
	Fasa T	19,971	119,96	31,6068	120,044
15	Fasa R	19,969	-0,044	29,0195	0,04472
	Fasa S	19,969	-120,04	29,0195	-119,96
	Fasa T	19,969	119,96	29,0195	120,045
16	Fasa R	19,969	-0,0443	25,3303	0,04483
	Fasa S	19,969	-120,04	25,3303	-119,96
	Fasa T	19,969	119,96	25,3303	120,045
17	Fasa R	19,968	-0,0448	21,8748	0,04491
	Fasa S	19,968	-120,04	21,8748	-119,96
	Fasa T	19,968	119,96	21,8748	120,045
18	Fasa R	19,968	-0,045	5,97604	0,04503
	Fasa S	19,968	-120,05	5,97604	-119,95
	Fasa T	19,968	119,95	5,97604	120,045
19	Fasa R	19,968	-0,0449	9,52166	0,04491
	Fasa S	19,968	-120,04	9,52166	-119,96
	Fasa T	19,968	119,96	9,52166	120,045
20	Fasa R	19,968	-0,0449	3,66233	0,04494
	Fasa S	19,968	-120,04	3,66233	-119,96
	Fasa T	19,968	119,96	3,66233	120,045

Lampiran 4. Hasil Hubung Singkat Singkat Satu Fasa Sistem Balance Terhubung DG

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	MATLAB (KA)	ETAP (KA)	%Error
	Fasa R	Fasa R	
1	3,3499	3,405	1,6194
2	3,3442	3,4	1,6418
3	3,3232	3,38	1,6814
4	3,3139	3,371	1,693
5	3,3096	3,367	1,7048
6	3,2924	3,35	1,7182
7	3,287	3,334	1,41

Lampiran 4. Hasil Hubung Singkat Satu Fasa Ketanah Sistem Balance Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	MATLAB (KA)	ETAP (KA)	%Error
	Fasa R	Fasa R	
8	3,2631	3,31	1,4184
9	3,2574	3,302	1,3516
10	3,2397	3,288	1,4699
11	3,2089	3,245	1,1116
12	3,1753	3,225	1,5402
13	3,1471	3,197	1,5599
14	3,1436	3,193	1,5481
15	3,1163	3,166	1,5711
16	3,1125	3,163	1,5966
17	3,1053	3,155	1,5765
18	3,0941	3,14	1,4634
19	3,1027	3,152	1,5628
20	3,099	3,147	1,5262

Lampiran 4. Hasil Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah Sistem Balance Terhubung DG

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		% Error	% Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	3,376	3,3761	3,33	3,296	1,382	2,430
2	3,3703	3,3704	3,324	3,291	1,394	2,413
3	3,3493	3,3494	3,301	3,273	1,464	2,334
4	3,3401	3,3402	3,291	3,265	1,492	2,302
5	3,3358	3,3358	3,287	3,261	1,483	2,295
6	3,3186	3,3187	3,268	3,246	1,548	2,238
7	3,3132	3,3132	3,25	3,231	1,943	2,545
8	3,2892	3,2893	3,224	3,209	2,023	2,501
9	3,2835	3,2836	3,217	3,201	2,068	2,580
10	3,2658	3,2659	3,199	3,189	2,089	2,411
11	3,2351	3,2352	3,161	3,145	2,344	2,866
12	3,2015	3,2016	3,129	3,131	2,317	2,253
13	3,1733	3,1734	3,098	3,105	2,430	2,201

Lampiran 4. Hasil Hubung Singkat Dua Fasa Ketanah Sistem Balance Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		% Error	% Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
14	3,1697	3,1698	3,094	3,102	2,448	2,186
15	3,1424	3,1425	3,065	3,078	2,526	2,095
16	3,1387	3,1387	3,06	3,074	2,571	2,106
17	3,1314	3,1315	3,053	3,068	2,569	2,069
18	3,1202	3,1203	3,039	3,052	2,673	2,237
19	3,1289	3,129	3,05	3,064	2,587	2,120
20	3,1251	3,1252	3,045	3,059	2,632	2,164

Lampiran 5. Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa Ketanah Sistem Balance Terhubung DG

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			% Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1	3,2442	3,2442	3,2442	3,207	3,207	3,207	1,161
2	3,2586	3,2586	3,2586	3,201	3,201	3,201	1,798
3	3,2175	3,2175	3,2175	3,18	3,18	3,18	1,181
4	3,2083	3,2083	3,2083	3,171	3,171	3,171	1,176
5	3,204	3,204	3,204	3,167	3,167	3,167	1,168
6	3,1868	3,1868	3,1868	3,149	3,149	3,149	1,201
7	3,1814	3,1814	3,1814	3,132	3,132	3,132	1,576
8	3,1574	3,1574	3,1574	3,108	3,108	3,108	1,59
9	3,1518	3,1518	3,1518	3,101	3,101	3,101	1,637
10	3,134	3,134	3,134	3,085	3,085	3,085	1,59
11	3,1033	3,1033	3,1033	3,047	3,047	3,047	1,848
12	3,0697	3,0697	3,0697	3,02	3,02	3,02	1,646
13	3,0415	3,0415	3,0415	2,991	2,991	2,991	1,688
14	3,038	3,038	3,038	2,988	2,988	2,988	1,672
15	3,0106	3,0106	3,0106	2,96	2,96	2,96	1,71
16	3,0069	3,0069	3,0069	2,956	2,956	2,956	1,721
17	2,9996	2,9996	2,9996	2,949	2,949	2,949	1,717
18	2,9884	2,9884	2,9884	2,935	2,935	2,935	1,82
19	2,9971	2,9971	2,9971	2,946	2,946	2,946	1,735

Lampiran 5. Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa Ketanah Sistem Balance Terhubung DG(lanjutan)

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			% Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
20	2,9933	2,9933	2,9933	2,941	2,941	2,941	1,78

Lampiran 6. Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa Sistem Balance Terhubung DG

Hubung Singkat Fasa dengan Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		% Error	% Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	2,8179	2,8574	2,799	2,799	0,67453	2,08682
2	2,813	2,8525	2,794	2,794	0,6786	2,09341
3	2,7948	2,8343	2,776	2,776	0,67615	2,10014
4	2,7868	2,8263	2,768	2,768	0,67811	2,10621
5	2,783	2,8226	2,764	2,764	0,68813	2,11831
6	2,7682	2,8077	2,75	2,75	0,66036	2,09745
7	2,7634	2,803	2,735	2,735	1,03985	2,48519
8	2,7427	2,7822	2,714	2,714	1,05785	2,51437
9	2,7378	2,7773	2,708	2,708	1,10007	2,55982
10	2,7225	2,762	2,694	2,694	1,05642	2,52376
11	2,6958	2,7354	2,661	2,661	1,30928	2,79481
12	2,6667	2,7063	2,638	2,638	1,08946	2,58795
13	2,6423	2,6815	2,614	2,614	1,0834	2,58225
14	2,6392	2,6788	2,611	2,611	1,08158	2,59556
15	2,6156	2,6551	2,587	2,587	1,10475	2,63278
16	2,6123	2,6519	2,583	2,583	1,1355	2,66589
17	2,6061	2,6456	2,577	2,577	1,12806	2,66162
18	2,5964	2,6359	2,565	2,565	1,22261	2,76335
19	2,6039	2,6434	2,574	2,574	1,16084	2,69658
20	2,6006	2,6401	2,57	2,57	1,19105	2,72918

Lampiran 7. Hasil Hubung Singkat Singkat Satu Fasa ke Tanah Sistem Balance Tanpa DG

Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah			
Bus	MATLAB (KA)	ETAP (KA)	%Error
	Fasa R	Fasa R	
1	2,8867	2,887	0,009
2	2,8811	2,881	0,002
3	2,8601	2,86	0,002
4	2,8508	2,851	0,0067
5	2,8465	2,846	0,017
6	2,8293	2,829	0,011
7	2,8239	2,812	0,422
8	2,7999	2,788	0,428
9	2,7943	2,782	0,441
10	2,7766	2,765	0,418
11	2,7458	2,734	0,432
12	2,7122	2,7	0,452
13	2,684	2,672	0,449
14	2,6805	2,669	0,429
15	2,6531	2,642	0,422
16	2,6494	2,638	0,432
17	2,6422	2,631	0,424
18	2,6309	2,619	0,456
19	2,6396	2,628	0,443
20	2,6359	2,624	0,452

Lampiran 8. Hasil Hubung Singkat Singkat Dua ke Tanah Fasa Sistem Balance Tanpa DG

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		% Error	% Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	2,8866	2,8867	2,887	2,887	0,0125	0,0104
2	2,881	2,881	2,881	2,881	0,0014	0
3	2,86	2,86	2,86	2,86	0,0017	0
4	2,8507	2,8508	2,851	2,851	0,0102	0,0081
5	2,8464	2,8465	2,846	2,846	0,013	0,016
6	2,8292	2,8293	2,829	2,829	0,008	0,01

Lampiran 8. Hasil Hubung Singkat Singkat Dua ke Tanah Fasa Sistem Balance Tanpa DG(lanjutan)

Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		% Error	% Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
7	2,8238	2,8238	2,812	2,812	0,419	0,421
8	2,7998	2,7999	2,788	2,788	0,424	0,426
9	2,7942	2,7942	2,782	2,782	0,437	0,439
10	2,7765	2,7765	2,765	2,765	0,414	0,416
11	2,7457	2,7458	2,734	2,734	0,428	0,431
12	2,7121	2,7122	2,7	2,7	0,449	0,451
13	2,6839	2,684	2,672	2,672	0,446	0,448
14	2,6804	2,6804	2,669	2,669	0,426	0,428
15	2,653	2,6531	2,642	2,642	0,418	0,42
16	2,6493	2,6494	2,638	2,638	0,428	0,43
17	2,6421	2,6421	2,631	2,631	0,42	0,422
18	2,6308	2,6309	2,619	2,619	0,452	0,454
19	2,6396	2,6396	2,628	2,628	0,441	0,441
20	2,6358	2,6358	2,624	2,624	0,448	0,45

Lampiran 9. Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa Ketanah Sistem Balance Tanpa DG

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			% Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
1	2,8867	2,8867	2,8867	2,887	2,887	2,887	0,009
2	2,8811	2,8811	2,8811	2,881	2,881	2,881	0,002
3	2,8601	2,8601	2,8601	2,86	2,86	2,86	0,002
4	2,8508	2,8508	2,8508	2,851	2,851	2,851	0,0067
5	2,8465	2,8465	2,8465	2,846	2,846	2,846	0,017
6	2,8293	2,8293	2,8293	2,829	2,829	2,829	0,011
7	2,8239	2,8239	2,8239	2,812	2,812	2,812	0,422
8	2,7999	2,7999	2,7999	2,788	2,788	2,788	0,428
9	2,7943	2,7943	2,7943	2,782	2,782	2,782	0,441
10	2,7766	2,7766	2,7766	2,765	2,765	2,765	0,418
11	2,7458	2,7458	2,7458	2,734	2,734	2,734	0,432
12	2,7122	2,7122	2,7122	2,7	2,7	2,7	0,452



Lampiran 9. Hasil Hubung Singkat Tiga Fasa Ketanah Sistem Balance Tanpa DG(lanjutan)

Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah							
Bus	MATLAB (KA)			ETAP (KA)			% Error
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Fasa R	Fasa S	Fasa T	
13	2,684	2,684	2,684	2,672	2,672	2,672	0,449
14	2,6805	2,6805	2,6805	2,669	2,669	2,669	0,429
15	2,6531	2,6531	2,6531	2,642	2,642	2,642	0,422
16	2,6494	2,6494	2,6494	2,638	2,638	2,638	0,432
17	2,6422	2,6422	2,6422	2,631	2,631	2,631	0,424
18	2,6309	2,6309	2,6309	2,619	2,619	2,619	0,456
19	2,6396	2,6396	2,6396	2,628	2,628	2,628	0,443
20	2,6359	2,6359	2,6359	2,624	2,624	2,624	0,452

Lampiran 10. Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa Sistem Balance Tanpa DG

Hubung Singkat Fasa dengan Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
1	2,4999	2,4999	2,5	2,5	0,0032	0,0032
2	2,495	2,495	2,495	2,495	0	0
3	2,4768	2,4768	2,477	2,477	0,007671	0,007671
4	2,4688	2,4688	2,469	2,469	0,0081	0,0081
5	2,4651	2,4651	2,465	2,465	0,00243	0,00243
6	2,4502	2,4502	2,45	2,45	0,00776	0,00776
7	2,4455	2,4455	2,435	2,435	0,43039	0,43039
8	2,4247	2,4247	2,415	2,415	0,40331	0,40331
9	2,4198	2,4198	2,41	2,41	0,40788	0,40788
10	2,4045	2,4045	2,394	2,394	0,43818	0,43818
11	2,3779	2,3779	2,368	2,368	0,41681	0,41681
12	2,3488	2,3488	2,339	2,339	0,41813	0,41813
13	2,3244	2,3244	2,314	2,314	0,44728	0,44728
14	2,3213	2,3213	2,311	2,311	0,44483	0,44483
15	2,2976	2,2976	2,288	2,288	0,42045	0,42045
16	2,2944	2,2944	2,284	2,284	0,45403	0,45403
17	2,2881	2,2881	2,278	2,278	0,44337	0,44337
18	2,2784	2,2784	2,268	2,268	0,45811	0,45811

Lampiran 10. Hasil Hubung Singkat Fasa dengan Fasa Sistem Balance Tanpa DG(lanjutan)

Hubung Singkat Fasa dengan Fasa						
Bus	MATLAB (KA)		ETAP (KA)		%Error	%Error
	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T	Fasa S	Fasa T
19	2,2859	2,2859	2,276	2,276	0,43585	0,43585
20	2,2827	2,2827	2,273	2,273	0,42455	0,42455

## BIOGRAFI PENULIS



Wiratama Tambunan atau sering dipanggil Wira lahir di Duri, 11 Januari 1996. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis mengawali pendidikannya di bangku SD Cendana Duri, kemudian dilanjutkan di SMP Cendana Duri dan SMA Cendana Duri. Pada tahun 2014, penulis diterima sebagai mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember tepatnya di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro. Selama di bangku kuliah, penulis menekuni bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selain itu juga, penulis aktif dalam kepanitiaan dan organisasi yang ada di dalam kampus. Pada tahun terakhir, penulis melaksanakan penelitian di Lab. Simulasi Sistem Tenaga untuk menyelesaikan tugas akhir.

Email : [wiratamatambunan80@gmail.com](mailto:wiratamatambunan80@gmail.com)  
Hp/WA : 081364402252  
Line : wiratama\_tambunan  
Instagram : wiratamatambunan